

III Научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии»,  
3-5 мая 2012 г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

# **ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ**

Материалы  
III Научно-практической конференции

Томск  
3-5 мая 2012 г.

УДК 621.391.08: 681.2.08 (063)

ББК 34.9л.0

И 741

**И 741 Информационно-измерительная техника и технологии:** материалы III Научно-практической конференции/ Под ред. А.В. Юрченко – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 200 с.

Сборник содержит доклады III Научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии», проходившей в г.Томск в Национальном исследовательском Томский политехническом университете 3-5 мая 2012 года.

Предназначен для специалистов, исследователей в сфере приборостроения, контроля и управления качеством, а также по проблемам НИРС в вузах.

**УДК 621.391.08: 681.2.08 (063)**

**ББК 34.9л.0**

*Секции конференции:*

*Секция 1.* «Разработка измерительных преобразователей, приборов и систем».

*Секция 2.* «Применения современных средств измерений и информационных технологий».

*Секция 3.* «Инновационные технологии в радиофизике».

*Секция 4.* «СВЧ и полупроводниковая электроника».

*Секция 5.* «Информационно-измерительная техника в неразрушающем контроле».

### **ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ:**

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
ОАО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов», г.  
Томск  
Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,  
г.Барнаул

### **ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ**

**Председатель конференции:** Юрченко А.В., д.т.н., профессор каф. ИИТ.  
**Председатель 1 секции:** Гольдштейн А.Е., д.т.н., зав.каф. ИИТ ИНК  
**Председатель 2 секции:** Козлов А.В. к.т.н., науч. сотр., ИОА СО РАН  
**Председатель 3 секции:** Шипилов С.Э., к.ф.-м.н., доцент каф. радиофизики ТГУ  
**Председатель 4 секции:** Сырямкин В.И., нач. лаб. ОАО «НИИПП»  
**Председатель 5 секции:** Дохтуров В.В.Руководитель производства ОАО  
«НИИПП»  
Сопредседатель: Siemens, E., prof., Anhalt University of Applied Sciences,  
Köthen, Germany  
**Ученый секретарь:** Козлов А.В., к.т.н., науч. сотр., ИОА СО РАН  
**Секретарь конференции:** Вавилова Г.В., зав.лаб. кафедры ИИТ ИНК

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОЭЛЕКТРОДОВ В АППАРАТУРЕ ДЛЯ<br>ИССЛЕДОВАНИЯ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА .....   | 7  |
| Д.К.Авдеева, И.А.Лежнина, А.А.Уваров, В.А.Сулайманова.....   | 7  |
| ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИФРОВЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ<br>МИКРОТОМОГРАФОВ.....   | 12 |
| Е.Н. Богомоллов, В.В. Бразовский, В.А. Бородин, В.И. Сырямкин.....   | 12 |
| ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА КОЛИЧЕСТВА<br>ПОГЛОЩЁННОЙ ЭНЕРГИИ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПО ДАННЫМ<br>MODIS/TERRA.....                              | 19 |
| М.А.Якунин .....   | 19 |
| ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫХОДНЫХ<br>ХАРАКТЕРИСТИК ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В ДИАГНОСТИКЕ<br>ЗАБОЛЕВАНИЙ ВЕРХНЕЧЕЛЮСТНЫХ ПАЗУХ.....       | 22 |
| Д.В. Миляев, В.Ф. Вотяков, А.В. Староха.....   | 22 |
| ОПТИМИЗАЦИЯ АППАРАТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ<br>КАРДИОЛОГИЧЕСКИХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ .....  | 31 |
| А.В. Кайгородов, А.Г. Якунин.....  | 31 |
| ACTUAL APPROACHES FOR - MULTICAST-BASED RELIABLE DATA TRANSPORT AND<br>THEIR DEFICIENCIES .....  | 39 |
| А. Bakharev; E. Siemens .....  | 39 |
| СИСТЕМА ТРЁХМЕРНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО РАДИОВИДЕНИЯ НА ОСНОВЕ<br>ИЗМЕРЕНИЙ АМПЛИТУДЫ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ.....  | 46 |
| К.В. Завьялова, Д.Я. Суханов.....  | 46 |
| НАСТРОЙКА БАЛАНСИРОВОЧНОГО СТЕНДА: К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ<br>ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АСИММЕТРИИ МАСС ТЕЛА .....   | 54 |
| А.В. Ключников .....   | 54 |
| ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ И МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СРЕДСТВ<br>РАЗРАБОТКИ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОГО ИНТЕРФЕЙСА ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ<br>КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ..... | 59 |
| С.А. Кожевников, А.Г. Якунин.....  | 59 |
| СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ОБНАРУЖЕНИЯ НАЗЕМНЫХ ВЗРЫВОВ.....  | 67 |
| Д.С. Провоторов, А.В. Соловьев .....   | 67 |
| СИСТЕМА КОНТРОЛЯ СООСНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ.....  | 73 |
| Д.В. Вахрушев, А.Е. Гольдштейн, Е.В. Якимов.....   | 73 |
| РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИБОРА НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО<br>ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ.....   | 82 |
| Е.И. Шкляр, Д.В. Миляев.....   | 82 |
| РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА<br>МИКРОПРИМЕСЕЙ В ЧИСТЫХ ГАЗАХ .....   | 91 |
| А.И. Насибулина, В.В.Александров*.....   | 91 |
| ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПОЛОГИИ АНТЕНН КВЧ ДИАПАЗОНА ДЛЯ АВТОДИННЫХ КВЧ<br>ДАТЧИКОВ .....  | 99 |
| В.И. Юрченко, А.П. Люлякин, А.А.Трубачев .....   | 99 |

|   |     |
|---|-----|
| СПОСОБЫ МАРКИРОВКИ РЕНТГЕНОВСКИХ СНИМКОВ .....  | 103 |
| М.К. Ковалев .....  | 103 |
| О ПОВЕРОЧНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ .....   | 109 |
| А.И. Насибулина, Ж.Б. Оспанова, Г.М. Тусупбекова.....   | 109 |
| ОПТИМИЗАЦИЯ ДВУХОСЕВОЙ СИСТЕМЫ СЛЕЖЕНИЯ ЗА СОЛНЦЕМ .....  | 114 |
| М.В. Китаева, А.В. Охорзина, А.В. Скороходов*, А.В. Юрченко .....   | 114 |
| ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРИБОРОВ И МЕТОДОВ<br>ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА..... | 125 |
| А.Д. Плотников .....  | 125 |
| К ВЫБОРУ ПОЛЕЗАДАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ .....   | 128 |
| К.С. Убониев.....   | 128 |
| АНАЛИЗ ПСИХОЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА С ПОМОЩЬЮ<br>АППАРАТУРЫ НА МЕДИЦИНСКИХ НАНОЭЛЕКТРОДАХ .....                     | 136 |
| А.В. Чистякова, И.В. Кашуба.....  | 136 |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСТНОСТИ<br>ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОЕМКОСТНЫМ МЕТОДОМ .....   | 143 |
| Н.С. Старикова, В.В. Редько .....   | 143 |
| РАЗРАБОТКА СТАНЦИИ МОНИТОРИНГА СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕЙ .....  | 149 |
| К.В. Суматохина, А. В. Охорзина, .....  | 149 |
| ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ.....  | 154 |
| О.А.Скрипка .....   | 154 |
| НЕЙРОННЫЕ СЕТИ В АКТИВНОМ ТЕПЛОВОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ (АТНК) ....   | 159 |
| А.М. Ширшова .....  | 159 |
| ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ МНОГОСЛОЙНЫХ<br>ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ.....  | 165 |
| А.А. Острасть .....   | 165 |
| РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЯ ДЛИНЫ НЕМАГНИТНЫХ ПРОТЯЖЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ<br>ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ.....                                      | 172 |
| Г.С. Гынгазова, Д.В. Миляев .....   | 172 |
| «РЕЛЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ» И ОДНОПРОВОДНАЯ ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ.....  | 184 |
| М. Г. Григорьев, Г.В. Вавилова .....  | 184 |
| АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УЧЕТА РАСХОДА ВОДЫ ДЛЯ ЖКХ .....   | 189 |
| Е.В. Кадалова, А.Б. Степанов .....  | 189 |
| ЛАЗЕРНЫЙ ДОПЛЕРОВСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ СКОРОСТИ И ДЛИНЫ .....   | 196 |
| А.В. Хурхесова, Е.М. Федоров .....  | 196 |
| ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ ГРОЗОВЫХ<br>РАЗРЯДОВ.....   | 202 |
| К.В. Вознесенская, А.В. Соловьев.....   | 202 |
| КОММУТИРУЕМАЯ СШП АНТЕННАЯ РЕШЕТКА ДЛЯ РАДИОВИДЕНИЯ .....   | 208 |
| Р.Н. Сатаров, И.Ю. Кузьменко, Т.Р. Муксунов, Е.В. Балзовский, А.В. Клоков, Ю.И.<br>Буянов, С.Э. Шипилов, В.П.Якубов .....     | 208 |

|   |     |
|---|-----|
| РАДИОВИДЕНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОВОЛНОВЫХ ДОПЛЕРОВСКИХ<br>ДАТЧИКОВ .....            | 212 |
| И.С. Федянин, И.Ю. Кузьменко, С.Э. Шипилов, В.П. Якубов .....                         | 212 |
| КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ РАДИО И УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ<br>ЛОКАЦИОННОЙ ТОМОГРАФИИ..... | 215 |
| С.Э. Шипилов, Д.Я. Суханов, В.П. Якубов .....   | 215 |
| УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СИСТЕМА 3D ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ.....                                       | 221 |
| И.Ю. Кузьменко, С.Э. Шипилов, В.П. Якубов.....  | 221 |
| МЕТАМАТЕРИАЛ ДЛЯ МИКРОВОЛН .....  | 225 |
| А.С. Мироньчев, В.П. Якубов.....  | 225 |

УДК 16.12-073.97-71; 621.39

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОЭЛЕКТРОДОВ В АППАРАТУРЕ ДЛЯ  
ИССЛЕДОВАНИЯ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА  
(APPLICATION PROSPECTS OF NANOELECTRODES IN EQUIPMENT FOR  
RESEARCH BIOELECTRICAL ACTIVITY OF HUMAN BODY)**

Д.К.Авдеева, И.А.Лежнина, А.А.Уваров, В.А.Сулайманова  
D.K.Avdeeva, I.A.Iezhnina, A.A. Uvarov, V.A. Sulaimanova

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
E-mail: inna84@sibmail.com

Показана перспектива и возможность использования медицинских нанoeлектродов для электроэнцефалографии (ЭЭГ), электрокардиографии (ЭКГ), электроокулографии (ЭОГ), электромиографии (ЭМГ), определение кожно-гальванической реакции (КГР).  
(The perspectives and availability of use of medical nano-electrodes for electroencephalography (EEG), electrocardiography (ECG), electrooculography (EOG), electromyography (EMG), galvanic skin response (GSR) are shown.)

**Ключевые слова:**

Нанoeлектроды, биопотенциал, высокое разрешение.  
(Nano-electrodes, biopotential, high resolution.)

В современных условиях развития здравоохранения чрезвычайно актуальной является задача разработки и внедрения в практику новых медицинских технологий, в том числе диагностических систем и комплексов, позволяющих повышать эффективность лечебно-диагностического процесса и сокращать экономические и трудовые потери.

В этой связи возрастает роль и значение функциональных методов исследования, которые широко применяются с целью раннего выявления патологии, дифференциальной диагностики различных заболеваний и контроля эффективности лечебно-оздоровительных мероприятий. [1,2]

Одной из наиболее распространенных методик оценки состояния биообъекта и его параметров в биологии и медицине является измерение его электрических характеристик: биопотенциалов, биотоков, либо проводимостей тканей, органов, жидкостей биологического происхождения – биоэлектролитов.

Электрофизиология изучает электрическое проявление жизнедеятельности клеток, тканей и органов для выяснения их природы, возможного физиологического значения, а также использования в качестве точных показателей функционирования, так как патологические изменения органов сказываются на параметрах и форме регистрируемых биоэлектрических потенциалов. В настоящее время известен целый ряд методов и средств диагностики, основанных на регистрации биоэлектрических сигналов, генерируемых различными органами и структурами человеческого организма.

В медицине широко используются электрографические методы, позволяющие проводить диагностику, прогнозирование и коррекцию функционального состояния организма человека, при которых устанавливается связь между электрофизиологическими и клинико-анатомическими характеристиками человека, изучается электрическая активность его органов и тканей. К наиболее информативным и широко используемым в медицинской практике методам относятся электроэнцефалография (ЭЭГ), электрокардиография (ЭКГ), электроокулография (ЭОГ), электромиография (ЭМГ), определение кожно-гальванической реакции (КГР).

Достоверность результатов электрофизиологического исследования во многом зависит от качества электродов, их физико-химических свойств. Электроды контактируют с поверхностью тела человека и таким образом замыкают электрическую цепь между генератором биопотенциалов и измерительным устройством. В настоящее время для чрескожной регистрации биопотенциалов используют электроды из различных материалов (нержавеющая сталь, никром, серебро, золото, углерод и т.д.).

Качество и достоверность регистрируемой информации также зависят от параметров электродов: электродного потенциала, напряжения поляризации, контактного потенциала, напряжения шума, полного электродного сопротивления, геометрических размеров электродов и т.д.

Биоэлектрические сигналы, регистрируемые при диагностике различных органов и тканей человека, занимают диапазон от единиц нановольт до десятков милливольт по амплитуде и от 0 Гц до 20 кГц по частоте. Эти обстоятельства определяют довольно жесткие требования к электродам по минимизации потерь полезного сигнала, которые необходимо учитывать при разработке электродов.

Современные нанотехнологии и наноматериалы открыли новые перспективы для создания нового поколения медицинских электродов - наноэлектродов, рис.1, имеющих на порядок более высокую стабильность электродного потенциала, стабильные контактные и поляризационные потенциалы, более низкое напряжение шума и сопротивление [3,4].

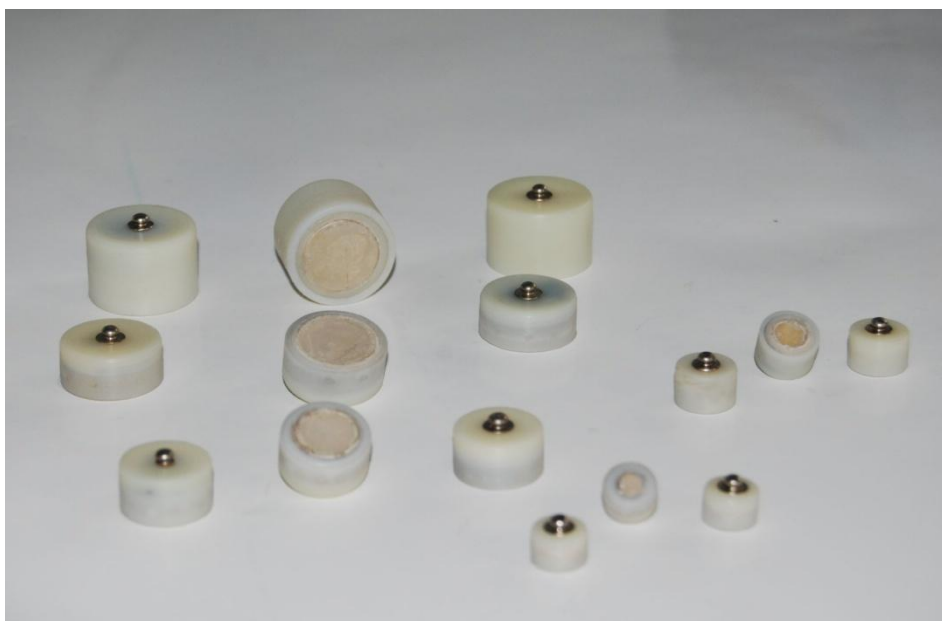


Рис.1. Наноэлектроды с кнопочным отведением различных типоразмеров в сравнении друг с другом

Преимущества наноэлектродов:

- практически не поляризуются при токах до 0,5 мкА и имеют низкие контактные потенциалы;

- дрейф электродного потенциала при токе в 1 нА составляет не более 0,001 мкВ/с; при токе в 100 нА – не более 0,01 мкВ/с.

Обычные электроды под воздействием биоэлектрической активности мышц, возникающей в процессе жизнедеятельности человека, поляризуются. По этой причине применяют либо фильтры, ограничивающие сигналы в области низких частот, либо разрабатывают следящую систему на цифро-аналоговых преобразователях для компенсации постоянной составляющей биоэлектрической активности во входной цепи. Чаще всего идут по пути ограничения полосы пропускания измерительной системы. Второй вариант применяют в приборах высокого разрешения, схема усложняется, содержит большее количество электронных компонентов, которые приводят к увеличению уровня базового шума и к снижению чувствительности. Постоянное напряжение на выходе ЦАП в следящей системе создаёт постоянные токи, протекающие через электроды, поляризуя их.

На рис.2 и 3 представлены записи электроэнцефалограммы с помощью электроэнцефалографических наноэлектродов.





Рис. 2. Электроэнцефалограмма



Рис. 3. Электроэнцефалограмма

На рис. 4 и 5 представлены записи электромиограммы с помощью электромиографических наноэлектродов.



Рис. 4. Электромиограмма при нагрузке



Рис. 5. Электромиограмма в покое

На рис.6 и 7 представлены записи электроокулограммы левого и правого глаза с помощью медицинских наноэлектродов.

Окулистом констатировано снижение зрения в правом глазу пациента, что зарегистрировано на электроокулограмме.



Рис. 6. Электроокулограмма – левый глаз



Рис. 7. Электроокулограмма – правый глаз

На рис.8 и 9 представлены записи биопотенциалов кожно-гальванической реакции (КГР) с помощью медицинских нанозлектродов.



Рис. 8. Сигнал КГР



Рис.9. Сигнал КГР, быстрые волны

На рис.10 а представлена запись электрокардиограммы, снятой с рук человека (левой и правой) с помощью разработанного нами наручного кардиомонитора. На электрокардиограмме представлена частота сердечных сокращений пациента, рис.10 б. Из записи видна зависимость частоты сокращений от амплитуды электрокардиосигнала, которая увеличивается в моменты резкого снижения амплитуды. Наручный кардиомонитор в дальнейшем найдет широкое применение для постоянного контроля за состоянием сердечно-сосудистой системы пациентов в постинфарктном состоянии.

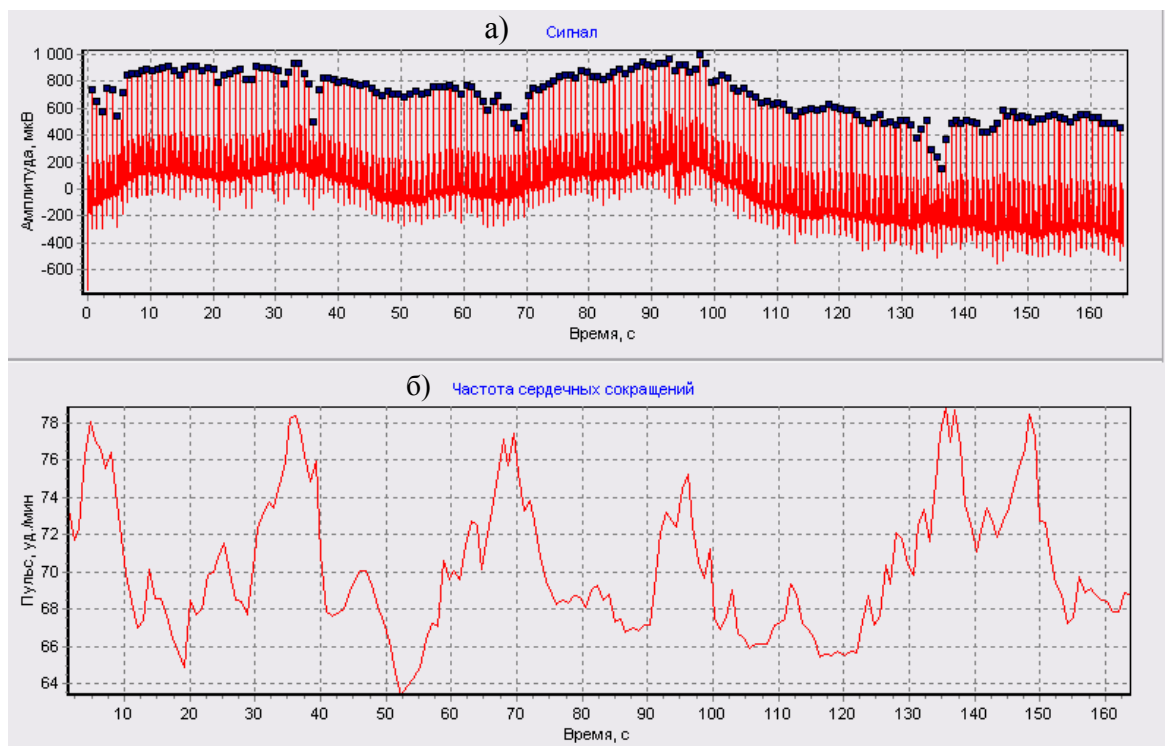


Рис. 10. Электрокардиограмма и частота сердечных сокращений

Проведены медицинские исследования медицинских нанозлектродов и разработанных макетов аппаратуры в Томском НИИ кардиологии. Получено высокое качество записи при регистрации электроэнцефалограммы, электромиограммы, электроокулограммы, сигнала кожно-гальванической реакции.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приказ Минздрава России "О совершенствовании службы функциональной диагностики в учреждениях здравоохранения Российской Федерации" от 30.11.93 № 283. URL: <http://www.consultant.ru/online/base/?req=doc;base=EXP;n=427821>
2. Высокие медицинские технологии – в практику функциональной диагностики. //Обозрение. Медтехника. -2007. -№5. URL: <http://www.altonika.ru/article.php?id=338> (дата обращения: 03.04.12).
3. Грехов И.С. Разработка и исследование автоматизированной установки для проверки медицинских хлор-серебряных электродов и медицинских нанозлектродов для съема поверхностных биопотенциалов человека: дис... канд.техн.наук – Томск.2008.-124с.
4. Лежнина И.А. Электрокардиограф на нанозлектродах : дис.... канд. технич. наук. — Томск. 2009. – С. 40-54.

#### Сведения об авторах:

**Авдеева Д.К.:** Томск, Томский политехнический университет, зав. лабораторией 63 ИНК ФГБОУ НИ ТПУ, д.т.н., профессор кафедры информационно-измерительной техники, сфера научных интересов: нанотехнологии, медицинское приборостроение, борьба с помехами, медицинские электроды. E-mail: [diana.avdeeva@mail.ru](mailto:diana.avdeeva@mail.ru).

**Лежнина И.А.:** Томск, Томский политехнический университет, к.т.н., доцент кафедры информационно-измерительной техники, старший научный сотрудник лаборатории 63 ИНК ФГБОУ НИ ТПУ, сфера научных интересов: исследование биоэлектрической активности сердца человека. E-mail: [inna84-08@mail.ru](mailto:inna84-08@mail.ru).

**Уваров А.А.:** Томск, Томский политехнический университет, аспирант ИНК ФГБОУ НИ ТПУ, сфера научных интересов: автоматический анализ электрофизиологических данных. E-mail: [uaa@tpu.ru](mailto:uaa@tpu.ru).

**Сулайманова В.А.:** Томск, Томский политехнический университет, студент кафедры информационно-измерительной техники Институт неразрушающего контроля, сфера научных интересов: исследование биоэлектрической активности сердца человека. E-mail: [venera\\_s91@mail.ru](mailto:venera_s91@mail.ru).

УДК 621.386.16.037.37:658.512.2

**ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИФРОВЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ  
МИКРОТОМОГРАФОВ  
(SELECTION OF OPTIMUM PERFORMANCE DIGITAL X-RAY  
MICROTOMOGRAPHY)**

Е.Н. Богомолов, В.В. Бразовский, В.А. Бородин, В.И. Сырямкин  
E. Bogomolov, V. Brazovsky, V. Borodin, V. Syriamkin

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
E-mail: vborodin@yandex.ru

Рассмотрены вопросы разработки рентгеновских микротомографов, предложена схема методики разработки, состоящая из трех уровней. Приведены обобщенная схема рентгеновского микротомографа, описан метод рентгеновской томографии пространственной микроструктуры и морфометрии материалов; показана архитектурная блок-схема программного обеспечения для интеллектуальной нейросетевой системы анализа внутренней микроструктуры объектов.

(The problems of the development of X-ray microtomography, the scheme of development methodology, consisting of three levels. Given the X-ray microtomography of a generalized scheme, described a method of X-ray imaging and morphometry of the spatial microstructure of materials; shows the architectural block diagram of software for the intelligent neural system analysis of the internal microstructure of objects.)

**Ключевые слова:**

Томография, дефектоскопия, диагностика, рентгеновский микротомограф, рентгенооптическая система, мехатронная система, система автоматизированного проектирования.

(Tomography, inspection, diagnosis, X-ray microtomography, X-ray system, mechatronic system, computer-aided design.)

Важным фактором создания рентгеновских микротомографов (РМТ) является разработка методики проектирования.

Для осуществления проектирования сложных систем в [1] предложен блочно-иерархический подход, при котором представления о проектируемой системе расчлениают на иерархические уровни. На верхнем уровне используют только самое общее представление системы, тогда как на последующих уровнях степень подробности описания возрастает, происходит переход к проектированию отдельных блоков системы с учетом их взаимодействия. Такой подход позволяет на каждом иерархическом уровне формулировать задачи приемлемого уровня сложности.

Для большинства задач характерно разбиение процесса проектирования на три уровня:

1) системный, на котором происходит наиболее общее описание процесса работы и параметров системы;

2) макроуровень, на котором проектируют отдельные узлы и устройства системы;

3) микроуровень, на котором проектируют отдельные детали и элементы узлов системы.

В [2, 3, 4] подробно рассматриваются вопросы диагностики и исследования материалов с помощью акустических, оптико-телевизионных устройств, методы сканирующей зондовой микроскопии и методы обработки и распознавания оптических и рентгеновских изображений. Так же в [2] показаны устройство и работа механизма сканирования оптико-телевизионной измерительной системы, которая, после адаптации, может использоваться в качестве одного из узлов рентгеновского микротомографа.

Особенностью процесса проектирования РМТ является то, что большая часть информации о проектировании аналогичных зарубежных устройств является закрытой коммерческой информацией. Соответственно, процесс проектирования, используемые технологии и подходы практически не освещаются в литературе.

Из приведенных источников в [1] освещаются только общие подходы к проектированию сложных систем, а в [2, 3, 4] в основном показаны методы и устройства для оптико-

телевизионной, акустической диагностики и методы сканирующей зондовой микроскопии, которые нуждаются в адаптации для проектирования рентгеновских устройств.

В процессе проектирования требуется составить ряд моделей устройства и его узлов, соответствующих различным иерархическим уровням, для чего и предлагается следующая методика разработки РМТ (рис. 1). Схема представляет собой итерационный процесс. Проектирование РМТ – это совокупность задач синтеза (выбор структуры и численных значений параметров разрабатываемых систем) и анализа (исследования синтезированной системы). Этап синтеза может повторяться, если будут отрицательны результаты анализа. В случае удовлетворительного результата итерационного процесса на данном этапе детализации, процесс проектирования переходит на следующий уровень проектирования.

Процесс проектирования можно условно разделить на три этапа: верхний, нижний и промежуточный. На первом (верхнем) этапе проектирования РМТ модель прибора представляется в виде содержательной модели, которая может описываться на естественном языке, поясняться схемами, эскизами, рисунками, чертежами, таблицами, графиками.

Второй уровень проектирования называют уровнем уточнения и параметризации модели. Этот уровень проектирования называют также уровнем синтеза математической модели, представляющей собой совокупность математических объектов (чисел, переменных векторов, множеств и т.п.) и отношений между ними, адекватно отражающая существование с позиций проектировщика свойства системы. Поскольку часто среди вариантов структуры ищется наилучший в некотором смысле, то такую задачу синтеза называют структурной оптимизацией, а расчет параметров, оптимальных с позиции некоторого критерия при заданной структуре РМТ, называют параметрической оптимизацией.

Если информативность содержательной модели окажется недостаточной для построения математической модели, то следует вернуться на первый уровень проектирования и декомпонировать содержательную модель по подсистемам проектируемого РМТ. При выборе содержательной модели и структурном синтезе РМТ следует использовать функционально-стоимостный анализ, являющийся комплексным методом, позволяющим спроектировать оптимальный вариант структуры изделия. Синтез математической модели можно производить известными методами, используемыми в системах автоматизированного проектирования. Второй этап проектирования РМТ заканчивается составлением технического задания для следующего этапа проектирования.

Третий (нижний) уровень проектирования должен содержать разработку прибора и заканчиваться этапом подготовки производства. В случае необходимости техническое задание на разработку макета может корректироваться по результатам его испытания. На этом этапе проектирования могут использоваться известные подсистемы САПР блоков РМТ.

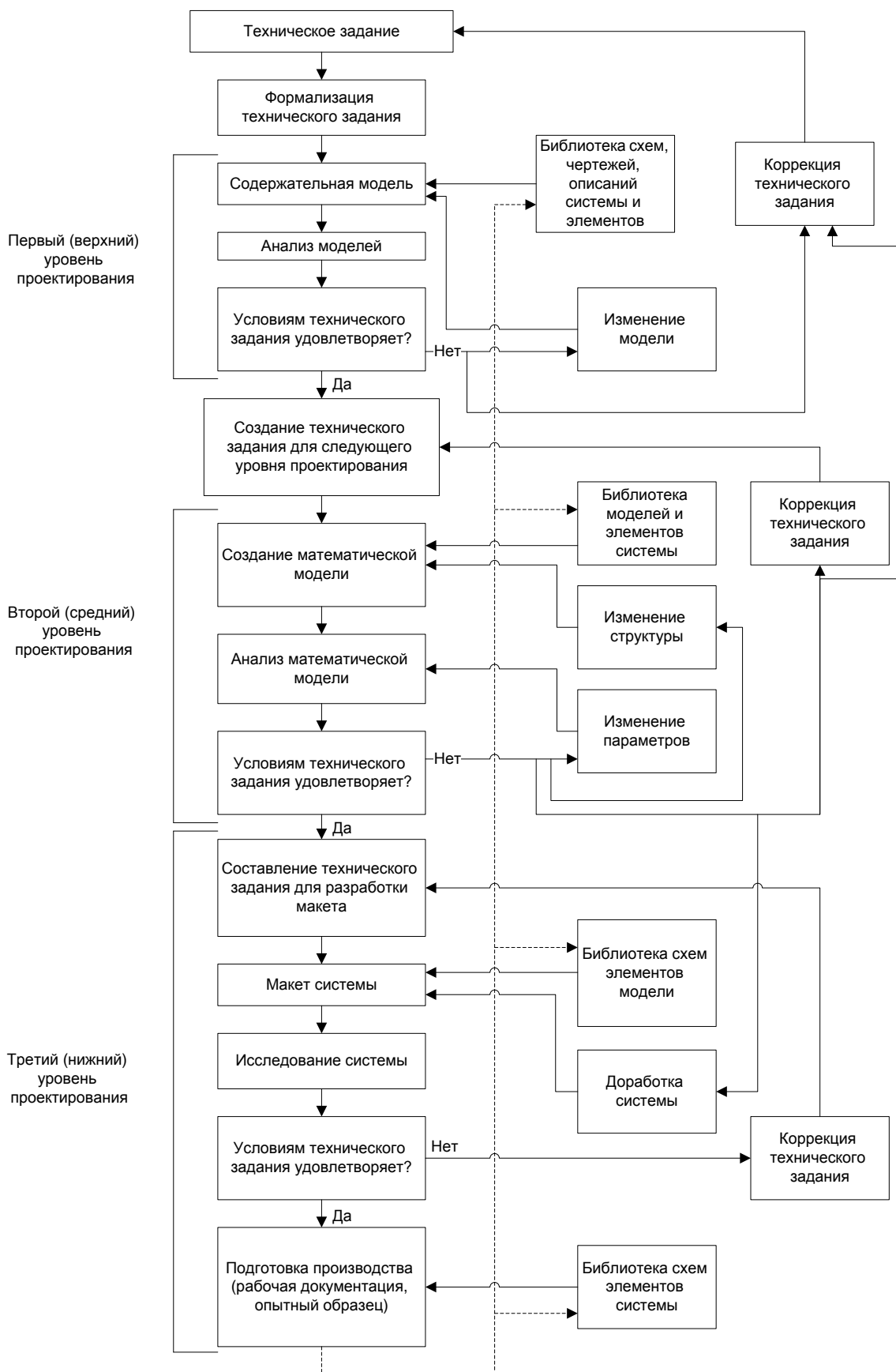


Рис. 1. Схема системы автоматизированного проектирования рентгеновского микротомографа

Следует еще раз отметить, что по результатам каждого уровня проектирования могут корректироваться (уточняться) технические задания на данный этап, либо общее техническое

задание на разработку РМТ (если это допустимо). После испытания макета и создания опытного образца проводится коррекция (исправление и дополнение) библиотек этапов. На рисунке 1 это воздействие показано пунктирной линией.

Если произведен выбор содержательной модели, осуществлена структурная и параметрическая оптимизация РМТ, то следует установить основные параметры РМТ и разработать методику расчета зрительной системы (расчет зрительной системы показан в [4]).

Компьютерные томографы создают цифровое изображение путем измерения интенсивности рентгеновских лучей, прошедших через тело во время вращения исследуемого объекта относительно рентгеновской трубки. Коэффициент поглощения веерного пучка рентгеновских лучей в объекте измеряется с помощью набора из нескольких сот до нескольких тысяч рентгеновских детекторов (обычно твердокристаллических). Детекторы собирают информацию в каждой из проекций, которая затем оцифровывается и анализируется компьютером. На основе полученных данных компьютер реконструирует поперечное компьютерно-томографическое изображение. Это изображение имеет целый ряд преимуществ, включая возможность его реконструкции в нужной проекции, а также высокую способность к передаче низкоконтрастных объектов, которая у компьютерных томографов значительно выше, чем у других методов построения рентгеновского изображения.

Полученные с помощью компьютерной томографии снимки отображают анатомическую структуру объекта в данном сечении с разрешением по плотности более 1%.

В настоящее время разработано большое количество эффективных алгоритмов, позволяющих на быстродействующих компьютерах получать томограммы по проекциям и реализованных на коммерческих компьютерных томографах.

Обобщенная схема рентгеновского микротомографа представлена на рисунке 2.

РМ состоит из следующих блоков:

1. Источник излучения (рентгеновская трубка).
2. Приемник излучения (рентгеновский детектор на ПЗС-матрице).
3. Мехатронная система (позиционирование по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ).
4. Рабочий стол (рабочая зона).
5. Корпус с высоковольтным источником питания.
6. Блок управления 1.
7. Блок управления 2.
8. Управляющее устройство (микроконтроллер или ПК-клиент).
9. Программное обеспечение (для восстановления 2D и 3D изображений).
10. Программное обеспечение для диагностики материалов.



Рис. 2. Обобщенная схема рентгеновского микротомографа

В системах спиральных компьютерных томографов сканирование и получение изображения происходят следующим образом. Рентгеновская трубка в режиме излучения обходит необходимый участок тела по дуге  $360^\circ$ , останавливаясь через каждые  $3^\circ$  этой дуги и делая продольное перемещение. На одной оси с рентгеновским излучателем закреплены детекторы - кристаллы йодистого натрия, преобразующие ионизирующее излучение в световое. Последнее попадает на фотоэлектронные умножители, превращающие эту видимую часть в электрические сигналы. Электрические сигналы подвергаются усилению, а затем преобразованию в цифры, которые вводят в ЭВМ. Рентгеновский луч, пройдя через среду поглощения, ослабляется пропорционально плотности тканей, встречающихся на его пути, и несет информацию о степени его ослабления в каждом положении сканирования.

Архитектурная блок-схема программного обеспечения для интеллектуальной нейросетевой системы анализа внутренней микроструктуры объектов (ИНСАВМО) представлена на рисунке 3.



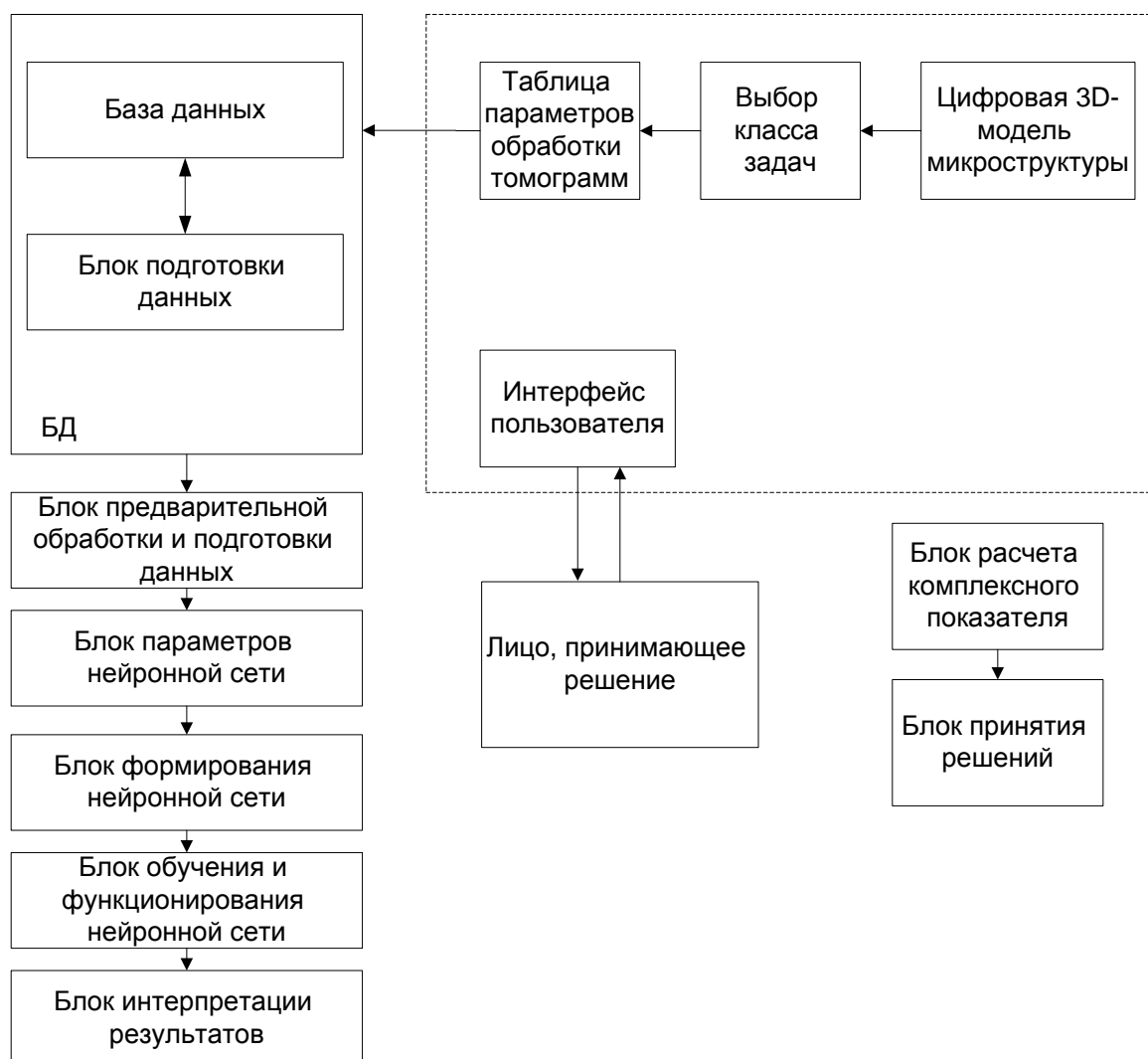


Рис. 3. Архитектурная блок-схема программного обеспечения для интеллектуальной нейросетевой системы анализа внутренней микроструктуры объектов

В состав программного обеспечения входят:

1. Модуль хранения и обработки базы данных (БД), включающий в себя непосредственно базу данных и блок подготовки данных.
2. Интерфейс пользователя, включающий цифровую модель микроструктуры объекта, инструментарий для выбора класса задач и таблицу параметров обработки томограмм.
3. Блок расчета комплексного показателя и блок принятия решений.
4. Блоки предварительной обработки и подготовки данных, параметров нейронной сети (НС), формирования НС, обучения и функционирования НС и блок интерпретации результатов.

Работа с ИНСАВМО включает в себя:

- Выбор класса задач анализа оператором (распознавание образов, анализ структуры на однородность, качественный анализ на аномальное изменение свойств объекта).
- Формирование таблицы параметров изображения построчно по каждому пикселю. Подготовка обучающей и тестируемой выборки на основе эталонных изображений.
- Создание нейросети (выбор топологии, инициализация карты синапсов).
- Обучение нейросети с сегментацией изображения в скрытом слое для определения и классификации характеристик исследуемого объекта.
- Тестирование нейросети.

При выборе конструктивных параметров РМТ может быть использована следующая методика, применение которой не зависит от области применения РМТ:

1. Задание максимально возможных геометрических размеров исследуемых объектов.
2. Определение круга решаемых задач и задание допустимых погрешностей рентгенооптической системы.
3. Расчет мощностных характеристик источника рентгеновского излучения.
4. Выбор источника рентгеновского излучения, исходя из требований по точности, разрешению и мощностным характеристикам.
5. Выбор детектора исходя из требований по точности, разрешению, цветовым и яркостным характеристикам восстанавливаемого изображения.
6. Определение допустимых погрешностей системы позиционирования при заданных требованиях по точности и разрешению восстанавливаемого изображения.
7. Выбор типа и вида манипулятора по требованиям точности, повторяемости движений и быстродействию.
8. Определение требований к системе управления манипулятором согласно требованиям по быстродействию.
9. Выбор платформы и необходимого оборудования системы управления и манипулятором с учетом требований.
10. Выбор методов и алгоритмов восстановления, распознавания и обработки графической информации.
11. Определение требований к вычислительно обрабатывающему центру.
12. Выбор платформы и необходимого оборудования с учетом требований к вычислительно обрабатывающему центру.
13. Определить требования к системе амортизации РМТ (система защиты от вибрации).
14. Определить общую компоновку узлов РМТ.
15. Спроектировать корпус согласно предъявляемым требованиям по безопасности и удобства эксплуатации.

В соответствии с вышеуказанной методикой проводится разработка рентгеновского микротомографа и системы автоматизированного проектирования РМТ.

Таким образом, разработанная схема САПР РМТ и методика разработки РМТ выполнены в соответствии с современными тенденциями разработки сложных систем – используемая трехуровневая схема позволяет на каждом из уровней формулировать задачи приемлемой сложности, предусматривает коррекцию технического задания и библиотек на каждом этапе разработки. Обобщенная схема рентгеновского томографа содержит предшествующие разработки в области диагностики материалов и систем управления, а программное обеспечение позволяет проводить все операции, необходимые при проведении исследования материалов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. 2-е издание. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 336 с.
2. Бубенчиков М.А., Газиева Е.Э., Гафуров А.О., Глушков Г.С., Жданов Д.С., Саньков Д.В., Сырямкин В.И., Шидловский С.В., Юрченко А.В. Современные методы исследования материалов и нанотехнологий. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2010. – 366 с.
3. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Макаров П.В. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов: В 2 т. / – Новосибирск: Наука, 1995. - Т. 1 - 298 с.
4. Сырямкина В.И., Титова В.С.. Системы технического зрения. Справочник. Томск: МГП «РАСКО», 1992. - 367 с: ил.

**Сведения об авторах:**

УДК 37.21.19:89.57.35

**ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА  
КОЛИЧЕСТВА ПОГЛОЩЁННОЙ ЭНЕРГИИ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ  
ПО ДАННЫМ MODIS/TERRA  
THE PROGRAM COMPLEX FOR REAL-TIME MONITORING OF NET SURFACE  
SHORTWAVE RADIATION ACCORDING TO THE MODIS/TERRA**

М.А.Якунин  
M.A.Yakunin

Алтайский Государственный Университет  
E-mail: m.yakunin89@gmail.com

Рассмотрен способ оперативного мониторинга количества поглощённой солнечной энергии на уровне подстилающей поверхности при помощи разработанного комплекса программ в Центре космического мониторинга и прогнозирования АлтГУ.

(перевод аннотации)

**Ключевые слова:**

Поглощённая солнечная энергия, оперативный мониторинг, MODIS.  
(Net surface shortwave radiation, real-time monitoring, MODIS.)

Солнечное излучение играет ведущую роль в формировании климата на нашей планете. В последнее время изучение физических процессов, влияющих на климат нашей планеты, вышло на качественно новый уровень. Количественные оценки поглощённой солнечной энергии позволяют предвидеть тенденции изменения климата на глобальных масштабах, что представляет собой актуальную задачу климатологии и физики. Активное её изучение началось в 1980-х годах: причиной этому стало развитие спутниковых технологий, позволяющих получать данные о состоянии атмосферы и подстилающей поверхности с любой точки на поверхности Земли в высоком пространственном разрешении. Вместе с этим были разработаны необходимые математические модели для расчёта количества поглощённой солнечной энергии.

В данной работе пойдет речь о технологии оперативного мониторинга количества поглощённой солнечной энергии на территории Большого Васюганского болота с использованием данных спектрорадиометра MODIS на спутнике Тетра. Методика восстановления поглощённого коротковолнового излучения представлена в работе [1]. Модель основана на использовании данных, полученных при помощи спектрорадиометра MODIS на спутнике Тетра.

Основным инструментом исследования атмосферы со спутника Тетра является 36-канальный спектрорадиометр MODIS (MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer). По данным, предоставляемым MODIS, проводится анализ и исследование широкого спектра явлений и характеристик как атмосферы, так и подстилающей поверхности - от мониторинга пожаров до измерения содержания аэрозолей в атмосфере [2].

Поток энергии, поглощённый подстилающей поверхностью,  $-a_s$  - может быть выражен через исходящий поток излучения на верхней границе атмосферы  $r$  следующим образом:

$$a_s = \alpha' - \beta' r,$$

где  $a_s$  определяется как:

$$a_s = \frac{NSSRd^2}{E_0 \cos \theta_s},$$

откуда следует, что

$$NSSR = \frac{a_s E_0 \cos \theta_s}{d^2},$$

где  $E_0$  - солнечная постоянная ( $1368 \text{ Вт/м}^2$ ),  $\theta_s$  - солнечный зенитный угол,  $d$  - расстояние от Земли до Солнца в астрономических единицах,  $NSSR$  - количество поглощённого коротковолнового излучения,  $r$  - коэффициент спектральной яркости на верхней границе атмосферы.

В свою очередь  $\alpha$  и  $\beta$  — параметры модели, зависящие от солнечного зенитного угла и положения сенсора на спутнике, типа подстилающей поверхности и концентрации водяного пара в атмосфере.

Необходимые для восстановления количества поглощённой энергии массивы данных содержатся в представленных ниже продуктах MODIS:

- MOD021km — калиброванные спектральные яркости;
- MOD03 — данные о геолокации положении Солнца и спутника;
- MOD05 — концентрация водяного пара в столбе атмосферы;
- MOD35 — маска облачности и маска подстилающей поверхности.

Центр Космического Мониторинга при Алтайском Государственном Университете осуществляет оперативный мониторинг состояния атмосферы и подстилающей поверхности на основе данных, получаемые со спутника Terra в реальном времени. На его базе был разработан программный комплекс, позволяющий проводить измерение количества поглощённой солнечной энергии практически в реальном времени на территории Западной Сибири во время дневного пролёта спутника.

«Сырой» поток данных, полученный со спутника, распаковывается, калибруется, после чего из всей области скана спутника выделяется исследуемая область, и для неё получают необходимые продукты данных в формате HDF. Затем с использованием этих данных рассчитывается количество поглощённого коротковолнового излучения на искомой пространственной области. Для проверки разработанного программного обеспечения было проведено сравнение значений количества поглощённого солнечного излучения в контрольных точках из статьи [1] со значениями в этих же точках этой же сцены, рассчитанными при помощи разработанного программного обеспечения. Необходимые для этого данные были взяты с сервера NASA. Результаты сравнения показали, что различия между значениями в работе [1] и значениями, рассчитанными при помощи разработанного программного обеспечения, не превышают  $24 \text{ W/m}^2$ .

Для мониторинга количества поглощённой солнечной энергии была выбрана область Большого Васюганского болота, расположенного в Западной Сибири в междуречье Оби и Иртыша. Площадь этих болот составляет 53 тыс. кв. км., протяжённость с запада на восток — 573 км, с севера на юг — 320 км. Как было показано в работе [3], Большое Васюганское болото активно участвует в термостабилизации климата: в течение тёплого полугодия происходит медленная аккумуляция тепла в деятельном слое торфяной залежи, а в течение холодного полугодия это тепло так же медленно (из-за низких значений коэффициента теплопроводности торфа) поступает в атмосферу. Это обеспечивает более высокий температурный фон над болотом в сравнении с минеральными грунтами, где процесс высвобождения накопленного тепла происходит значительно быстрее.

На территории Большого Васюганского Болота были выбраны 4 контрольных точки для проведения исследования со следующими координатами:

- А ( $58^\circ 38' 32''$  с.ш.,  $81^\circ 13' 36''$  в.д.);
- В ( $56^\circ 34' 07''$  с.ш.,  $76^\circ 04' 43''$  в.д.);
- С ( $60^\circ 28' 52''$  с.ш.,  $71^\circ 52' 28''$  в.д.);
- D ( $58^\circ 07' 30''$  с.ш.,  $76^\circ 04' 47''$  в.д.).

Данные по территории Большого Васюганского Болота были обработаны при помощи разработанного комплекса программ. Полученные результаты за период апрель-сентябрь 2011 года представлены на Рис. 1.

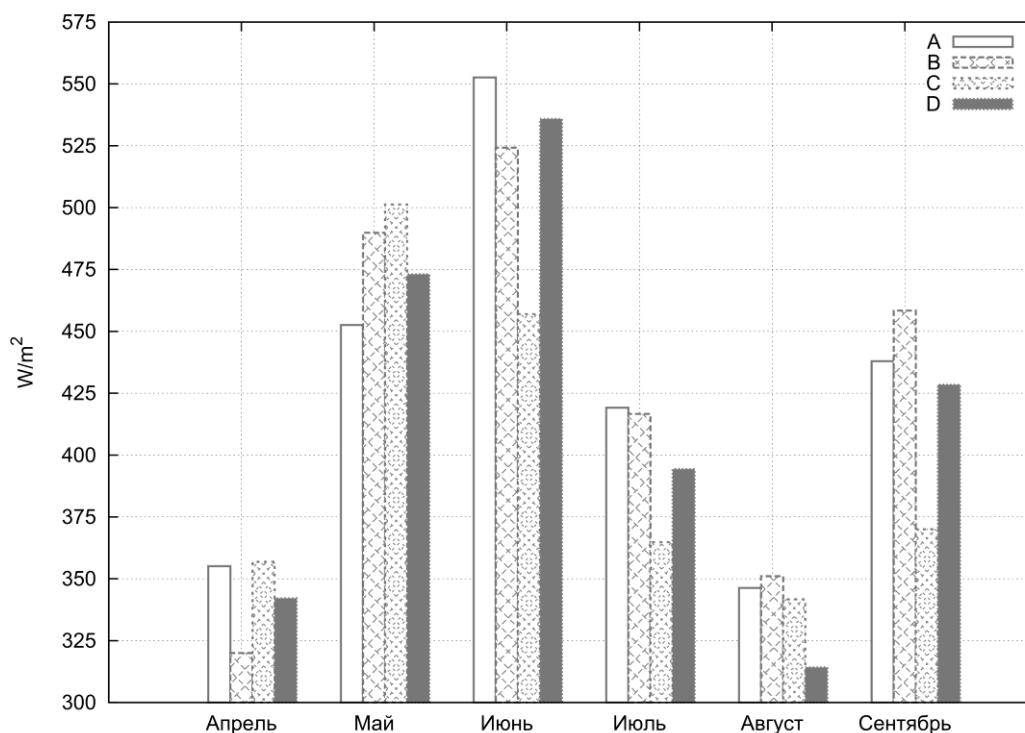


Рис. 1. Характер поведения среднемесячных значений поглощённой энергии в апреле-сентябре 2011 г.

Из графика видно, что поглощение солнечной энергии максимально в мае-июне и идёт на спад к осени. Однако за счет большого количества солнечных дней в сентябре, количество поглощённой энергии в этом месяце было больше, чем в июле и августе.

В ходе данной работы было разработано программное обеспечение для оперативного мониторинга количества поглощённой солнечной энергии в коротковолновом диапазоне длин волн в соответствии с моделью, описанной в работе. Данное программное обеспечение установлено и работает в Центре космического мониторинга и прогнозирования АлтГУ, позволяя проводить ежедневный мониторинг поглощённого солнечного излучения, получая данные непосредственно со спутника в режиме реального времени. В дальнейшем планируется провести статистическое исследование данных о поглощённой солнечной энергии на территории Большого Васюганского болота за прошлые годы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bohui Tang, Zhao-Liang Li, Renhua Zhang. A direct method for estimating net surface shortwave radiation from MODIS data. // Remote sensing of Environment. - 2006. - Т. 103 - с. 115-126.
2. Лагутин А.А., Никулин Ю.А., Жуков А.П. и др. Математические технологии оперативного регионального спутникового мониторинга характеристик атмосферы и подстилающей поверхности. Ч.1. MODIS. // Вычисл. Технологии. - 2007. - Т. 12, №2. - с. 66-77.
3. Ипполитов И.И., Кабанов, М.В., Лагутин А.А., Логинов С.В. Мезомасштабное влияние большого васюганского болота на температурный режим территории. // Шестое сибирское совещание по климато-экологическому мониторинга. Материалы совещания. - 2005. - С. 49-54.

#### Сведения об авторах:

**Якунин М.А.:** г. Барнаул, АлтГУ, магистрант, сфера научных интересов: дистанционное зондирование Земли из космоса.

УДК 528.88

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫХОДНЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В ДИАГНОСТИКЕ  
ЗАБОЛЕВАНИЙ ВЕРХНЕЧЕЛЮСТНЫХ ПАЗУХ  
(THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OUTPUT  
CHARACTERISTICS EDD TRANSDUCERS IN DIAGNOSTICE DISEASES OF SINUSES)**

Д.В. Миляев, В.Ф. Вотяков, А.В. Староха  
D.V. Milyaev, V.F.Votyakov, A.V. Staroha

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
\*Томский филиал ФГУ «Научно-клинический центр оториноларингологии ФМБА  
России»  
E-mail: mdv@tpu.ru

Проведен расчет и анализ выходных характеристик вихретокового преобразователя, расположенного над двухслойной полупроводящей средой.

Рассмотрен частотно-фазовый метод обработки измерительной информации и структурные схемы его реализации. Проведены экспериментальные исследования выходных характеристик вихретокового преобразователя расположенного над полупроводящей биологической средой, в частности, тканей животного с различными значениями электропроводности: жир, кость, мышца.

Показано что, для обнаружения патологических изменений требуется устройства обработки с высокой чувствительностью. Таким требованиям, в частности, удовлетворяет устройство с частотно-фазовой расстройкой резонансного контура, с включенным в него параметрическим вихретовым преобразователем.

(The calculation and analysis of output characteristics of the eddy-current transducer, which is located above the two-layer semiconducting media. We consider the frequency-phase method of measuring information processing and structural schemes for its implementation. Experimental studies of the output characteristics of eddy current transducer located above the semi-conductive biological environment, in particular, animal tissues with different conductivity values: fat, bone and muscle. It is shown that, for the detection of pathological changes require processing device with high sensitivity. These requirements, in particular, the device satisfies the phase-frequency detuning of the resonant circuit, with the inclusion of parametric eddy-current converter.)

**Ключевые слова:**

Верхнечелюстные пазухи, патология, вихретоковый преобразователь, частотно-фазовый метод, диагностика, двухслойная полупроводящая среда.

(The maxillary sinus pathology, eddy-current converter, a frequency-phase method, diagnosis, Semi-layer medium.)

Одной из отраслей медицинской науки, которая занимается определением признаков болезни, устанавливает заключение о характере болезни и ее существовании, является диагностика.

Данная работа посвящена актуальной проблеме в медицине - диагностике патологических изменений околоносовых пазух без хирургического вмешательства.

Известно множество способов и методов исследования верхнечелюстных пазух носа: рентгенография, зондирование, пункция, эхография, эндоскопия пазух и т.д. Но они обладают рядом недостатков: нежелательная лучевая нагрузка, дискомфорт, невысокая точность и информативность. Поэтому возникает необходимость дальнейших разработок безвредных для организма устройств и приборов для диагностических целей и их совершенствования.

В данной работе рассматривается возможность использования вихретокового метода для диагностики патологических изменений верхнечелюстных пазух.

Этот метод дает возможность осуществлять длительную регистрацию физиологических функций в условиях сравнительного комфорта пациента с измененными во времени метрологическими характеристиками биологической системы объект-датчик.

Вихретоковый метод относится к бесконтактным методам, суть которого заключается в следующем. При воздействии на исследуемую среду электромагнитного поля, искажается картина поля, а сама среда либо поляризуется, либо в ней наводятся вихревые токи, либо то и

другое. Вид поляризации процессов, распределение вихревых токов и возмущенного поля зависит от электрических свойств среды, геометрической формы и размеров пазухи, от влажности, температуры, химического состава, структурных особенностей биологических тканей.

Изменение свойств сложных сред заключается в том, что оценивая при внесении возмущенного поля в среду, поле или величину реакции, испытываемое источником поля, можно судить о свойствах среды.

Околоносые пазухи в здоровом состоянии заполнены воздухом. Внутри пазуха покрыта слизистой оболочкой. В состоянии заболевания слизистая оболочка воспаляется, набухает, а пазуха заполняется патологической слизью, которая обладает определенной электропроводностью и диэлектрической проницаемостью. Следовательно, больная пазуха отличается от здоровой по значениям электропроводности и диэлектрической проницаемости.

Диапазон частот возбуждающего электромагнитного поля, в целях электробезопасности, рекомендуется выбирать от 30 кГц до 30 МГц.

Чувствительность вихретокового преобразователя оценивается по значению обобщенного параметра  $\beta$  [1]:

$$\beta = R\sqrt{2\pi f\sigma\mu\mu_0}, \quad (1.1)$$

где:  $R$  – средний радиус катушки (датчика);  $f$  – частота возбуждающего электромагнитного поля;  $\sigma$  – удельная электропроводность биосреды;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость биосреды;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная проницаемость вакуума.

Из формулы (1.1) видно, что при малых  $\sigma$  ( $\leq 1,5$  См/м) чувствительность возрастает с увеличением среднего радиуса катушки ВТП и частоты. Но радиус катушки определяется размером пазух и локальностью электромагнитного излучения.

Следовательно, для повышения чувствительности необходимо повышать частоту. В работе исследовано взаимодействие электромагнитного поля с биотканью, и определена глубина проникновения этого поля, которая определяется по формуле:

$$d = \frac{1}{2\pi f \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \mu_0}{2} \left[ \sqrt{1 + (\operatorname{tg} \delta)^2} - 1 \right]}}, \quad (1.2)$$

$\operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon \omega}$  – тангенс угла диэлектрических потерь;

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума;

$\varepsilon \approx 100$  – относительная диэлектрическая проницаемость биосреды на частоте

$f = 10^5$  Гц, где  $\omega = 2\pi f$

С учетом геометрических размеров преобразователя, глубина проникновения электромагнитного поля определяется по формуле:

$$d_p = de \frac{2l}{R},$$

где:  $d_p$  – глубина проникновения электромагнитной волны с учетом геометрических размеров катушки;  $R$  – средний радиус катушки (датчика);  $l$  – ширина намотки катушки.

### **1. Анализ выходных характеристик вихретокового преобразователя, расположенного над двухслойной полупроводящей средой**

С целью дифференцирования вида заболевания, представляет интерес, каким образом влияют электрофизические параметры содержимого пазухи на выходные характеристики накладного вихретокового преобразователя (ВТП). В ранее проведенных теоретических исследованиях [2,3] расчетная модель была представлена в виде "накладной преобразователь - полупроводящее полупространство". Недостатком такой модели является то, что в выходных характеристиках ВТП не учитывалось влияние электрофизических и геометрических параметров передней стенки пазухи.

В работе [4] расчетная модель представлена в виде витка радиусом  $R=15 \cdot 10^{-3}$  м, расположенного на расстоянии  $h = 10^{-3}$  м. от двухслойной среды, которая представляет собой пластину толщиной  $d=10^{-2}$  м. и полупространство (рис.1). Слой моделирует костную ткань

передней стенки пазухи, а полупространство-содержимое пазухи. По витку протекает переменный ток  $\dot{I} = I_m e^{j\omega t}$ , который создает переменное возбуждающее электромагнитное поле с круговой частотой  $\omega$ .

Считаем, что двухслойная среда линейная и обладает немагнитными свойствами. В качестве выходной характеристики рассматривается относительное значение вносимого напряжения, которое определяется как:

$$\dot{U}_{вн} = j \frac{\dot{A}_{вн}}{|\dot{A}_0|}$$

Вносимый векторный потенциал (1.3) поля, обусловленный влиянием исследуемой биологической среды можно представить в виде [5]:

$$\dot{A}_{\dot{a}i} = \frac{\mu_0 \dot{I} R}{2} \cdot \int_0^{\infty} J_1(\lambda R) \cdot J_1(\lambda r) - e^{-q_1(z+h)} N_1 d\lambda \quad (1.3)$$

где

$J_1$  - функция Бесселя первого рода первого порядка;

$\lambda$  - параметр интегрирования;

$N_1$  - постоянная интегрирования, которая определяется в соответствии с формулой 1.4, принимая соответствующие значения параметров: в верхнем полупространстве:

$$\varepsilon_1 = 0, \sigma_1 = 0, q_1 = \sqrt{\lambda^2 - \omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon_1 \mu_0}$$

$$N_1 = \frac{(q_3 - q_2 e^{q_3 d}) \cdot (q_1 + q_2) \cdot e^{-q_2 d} - (q_3 + q_2 e^{q_3 d}) \cdot (q_1 - q_2) \cdot e^{q_2 d}}{\Delta_2} \quad (1.4)$$

$$\Delta_2 = (q_3 - q_2 e^{q_3 d}) \cdot (q_1 - q_2) \cdot e^{-q_2 d} - (q_3 + q_2 e^{q_3 d}) \cdot (q_1 + q_2) \cdot e^{q_2 d} \quad (1.5)$$

$\varepsilon_2; \sigma_2; q_2 = \sqrt{\lambda^2 - \omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon_2 \mu_0 + j\omega \mu_0 \sigma_2}$  - значение параметров в верхнем слое;

$\varepsilon_3; \sigma_3; q_3 = \sqrt{\lambda^2 - \omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon_3 \mu_0 + j\omega \mu_0 \sigma_3}$  - значение параметров в нижнем полупространстве.

Векторный потенциал (1.6) поля в воздухе:

$$\dot{A}_0 = \frac{\mu_0 \dot{I}_m R}{2} \int_0^{\infty} J_1(\lambda R) \cdot J_1(\lambda r) \cdot \frac{\lambda}{q_1} \cdot e^{-q_1(z-h)} d\lambda \quad (1.6)$$

Тогда

$$\dot{U}_{\dot{a}i} = j \cdot \frac{\dot{A}_{\dot{a}i}}{|\dot{A}_0|} = \frac{\frac{\mu_0 \dot{I} R}{2} \int_0^{\infty} J_1(\lambda R) \cdot J_1(\lambda r) \cdot \frac{\lambda}{q_1} \cdot e^{-q_1(z+h)} N_1 d\lambda}{\frac{\mu_0 \dot{I}_m R}{2} \int_0^{\infty} J_1(\lambda R) \cdot J_1(\lambda r) \cdot \frac{\lambda}{q_1} \cdot e^{-q_1(z-h)} d\lambda} \quad (1.7)$$

Расчет вносимого напряжения (1.7) проводится с использованием численных методов, которые позволяют получить более точные значения выходных характеристик ВТП, чем при расчете по приближенным аналитическим выражениям.

На рисунке 2, и рисунке 3 приведены годографы относительных вносимых напряжений для различных значений обобщенных параметров  $\beta$  и  $\alpha_3$  полупроводящего полупространства. Электрофизические параметры первого слоя неизменны и, примерно, равны  $\sigma_2 = 0,05$  См/м,  $\varepsilon_2 = 100$  [6]. Из рисунка 2. видно, что при увеличении обобщенного параметра  $\beta$  ( $\sigma_3 = \text{var}$ ) активная составляющая вносимого напряжения возрастает линейно, а реактивная - практически не изменяется.

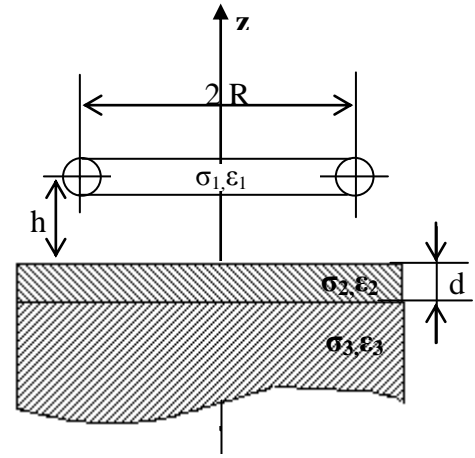


Рис. 1. Расчетная модель



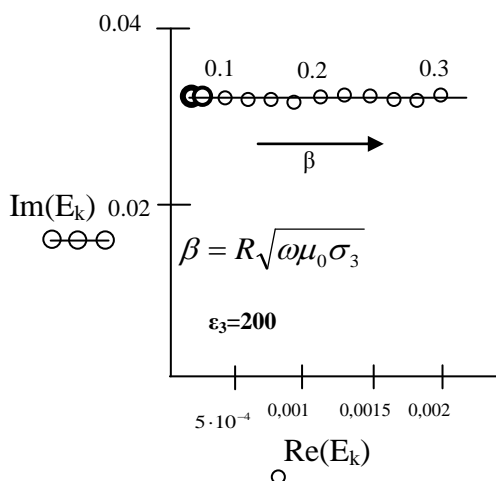


Рис. 2. Годограф относительного вносимого напряжения для различных значений обобщенного параметра  $\beta$ .

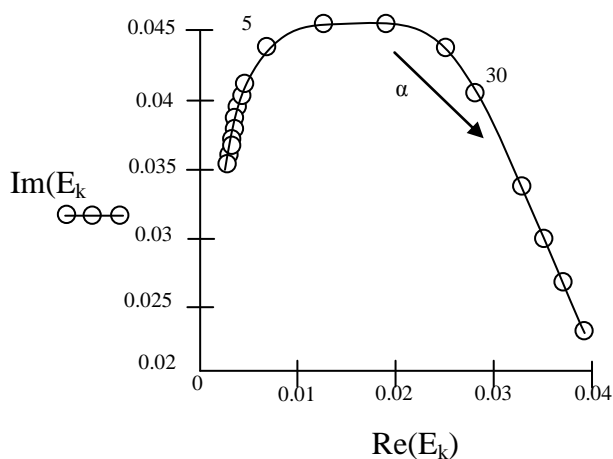


Рис. 3. Годограф относительного вносимого напряжения для различных значений обобщенного параметра  $\alpha$ .

При увеличении обобщенного параметра  $\alpha$  ( $\sigma_3 = \text{VAR}$ ) (рис.3) активная составляющая вносимого напряжения непрерывно возрастает, а реактивная - достигает максимального значения при  $\alpha = 11$  ( $\epsilon_3 = 2 \cdot 10^4$ ), а затем начинает спадать и при больших значениях  $\alpha$  приближается к нулевому значению.

Таким образом, для дифференцирования вида заболеваний пазухи в качестве информативного параметра рекомендуется брать активную составляющую вносимого напряжения.

## 2. Разработка частотно-фазового метода обработки сигналов вихретокового преобразователя

Для исследования вихретокового метода применительно к диагностике заболеваний верхнечелюстных пазух были рассмотрены амплитудно-фазовый, частотный и частотно-фазовый методы обработки сигналов преобразователя.

Амплитудно-фазовый метод выделения и обработки полезного сигнала заключается в измерении вносимого напряжения вихретокового преобразователя (ВТП) при различных сдвигах фазы между вносимым и опорным напряжением [7]. Первичный преобразователь трансформаторного типа. Величина сдвига фазы регулировалась, чтобы обеспечить наибольшую чувствительность к содержимому пазухи. Результаты экспериментальных исследований показали, что наибольшая чувствительность наблюдается при  $\beta = 0,05$ . Однако, исследования показали недостаточно высокую чувствительность данного метода.

Частотный метод реализуется схемой, в которой вихретоковый преобразователь параметрического типа, включен в резонансный колебательного контура автогенератора [1]. При этом информативным параметром является относительное изменение частоты, вызванное различием в электрической проводимости здоровой пазухи и пазухи заполненной экссудатом. Но при этом изменение частоты зависит, от приращения реактивной составляющей преобразователя.

В настоящей работе подробно рассматривается метод, основанный на частотно-фазовом способе выделения полезной информации. Суть метода заключается в том, что приращения активного и реактивного сопротивления вихретокового преобразователя за счет фазового сдвига, вводимого в резонансный контур, умножаются на тангенс угла фазового сдвига.

В реальном устройстве используется автогенератор, в цепь положительной обратной связи которого включен управляемый фазовращатель. При этом частота генератора зависит не только от реактивного сопротивления (как в обычном автогенераторе), так и от активного сопротивления. Их воздействие на частоту можно регулировать, изменяя фазовый сдвиг в контуре.

Информативным параметром, также как и при частотном методе, является относительное изменение частоты.

В случае появления патологического содержимого, электропроводность исследуемой области возрастает, следовательно, возрастает и плотность вихревых токов. Этот факт приводит к изменению индуктивности ВТП, а его изменение, в свою очередь, приводит к изменению частоты резонансного контура: Так как

$$\omega_0 = \sqrt{1/LC}, \quad (2.1)$$

то относительное приращение частоты можно представить в виде (2.2) [8]:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{X_{вн}}{2X_0}, \quad (2.2)$$

где:

$L$  - индуктивность преобразователя;  $C$  - емкость колебательного контура;

$X_0$  - начальное реактивное сопротивление преобразователя;

$X_{вн}$  - вносимое реактивное сопротивление преобразователя.

Вносимое активное сопротивление преобразователя на частоту, в первом приближении, не влияет на изменение частоты резонансного контура. Увеличить влияние активного сопротивления на частоту можно путем введения фазового сдвига в колебательный контур. При этом частота генератора и изменение частоты можно выразить соотношениями (2.3) и (2.4) из [13]:

$$\omega_r = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{Q^2} - \frac{1}{Q} \cdot \operatorname{tg} \varphi}, \quad (2.3)$$

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_r} = \frac{1}{2} \left( \frac{\operatorname{tg} \varphi}{Q} - 1 \right) \cdot \frac{X_{ái}}{X_0} - \left( \frac{1}{Q} + \operatorname{tg} \varphi \right) \cdot \frac{R_{ái}}{X_0}, \quad (2.4)$$

где:

$Q$  - добротность преобразователя;

$\varphi$  - фазовая расстройка контура,

$\Delta\omega/\omega_g$  - относительное изменение частоты;

$R_{вн}$  - вносимое активное сопротивление преобразователя.

Из этих выражений видно, что введение фазовой расстройки колебательного контура, существенно увеличивает влияние активного сопротивления на частоту генератора, причем знак фазовой расстройки контура может привести как к увеличению частоты, так и уменьшению ее.

Введение фазового сдвига в колебательный контур позволяет при выборе определенного сдвига получить различные влияния контролируемых и неконтролируемых параметров, а таким образом, уменьшить влияние мешающего фактора и сохранить высокую чувствительность к полезному параметру.

При контроле биологических сред электропроводность составляет доли См/м, поэтому даже на высоких частотах приращение активного сопротивления преобразователя незначительна, что не позволяет применять автогенераторные схемы без фазовой расстройки.

Были проведены экспериментальные исследования на полупроводящих биологических средах, в частности, на свежих образцах биологических тканей животного с различными значениями электропроводности: жир, кость, мышца [9].

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 4.

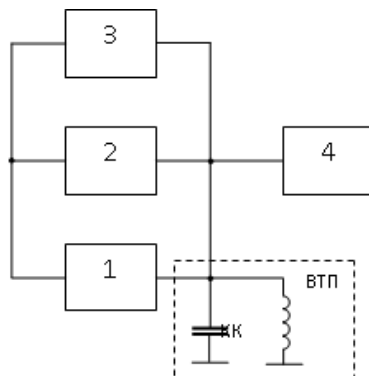


Рис. 4. Схема экспериментальной установки.

где:

- 1 - усилитель, КК - резонансный контур,
- 2 - регулируемый фазовращатель;
- 3-частотомер;
- 4-фазомер.

Вихрековый преобразователь (ВТП) представляет собой катушку индуктивности накладного типа. Автогенератор собран по схеме Батлера, в цепь положительно обратной связи которого, включен регулируемый фазовращатель. Измерение относительного изменения частоты и фазового сдвига осуществляется соответственно частотомером 3 и фазомером 4.

Исследования проводились в частотном диапазоне  $f = (1...5)$  МГц, при значениях фазовой расстройки  $\varphi$  от  $0^\circ$  до  $\pm 70^\circ$ . Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунке 5. в виде графиков, из которых видно, что введение фазовой расстройки в резонансный контур генератора действительно увеличивает чувствительность к электропроводности [8,9]. Причем для костной и жировой тканей зависимости относительного изменения частоты от величины фазовой расстройки практически идентичны и имеют максимум при величине сдвига фаз  $\varphi \approx 20^\circ$ . Для мышечной ткани наблюдается существенное увеличение чувствительности при  $\varphi = -(20^\circ...25^\circ)$ .

Таким образом, экспериментально доказано, что использование частотно-фазового способа выделения и обработки полезного сигнала наиболее эффективно.

К примеру, учитывая схожие электрофизические свойства мышечной ткани и полипов можно повысить точность диагностики, установив величину  $\varphi \approx -25^\circ$ .

В качестве примера можно отметить, что наибольшее значение чувствительности к мышечным тканям составляет  $\Delta\omega/\omega_r = 14\%$ , при  $\varphi = 26^\circ$  и  $f_0 = 4$  МГц. В то время как для жировой и костной тканей  $\Delta\omega/\omega_r = 0.5\%$ .

Без введения фазовой расстройки чувствительность ко всем видам биотканей получается примерно одинаковой и равна  $\Delta\omega/\omega_r = 0.8\%$ , при  $f_0 = 3230$  кГц.

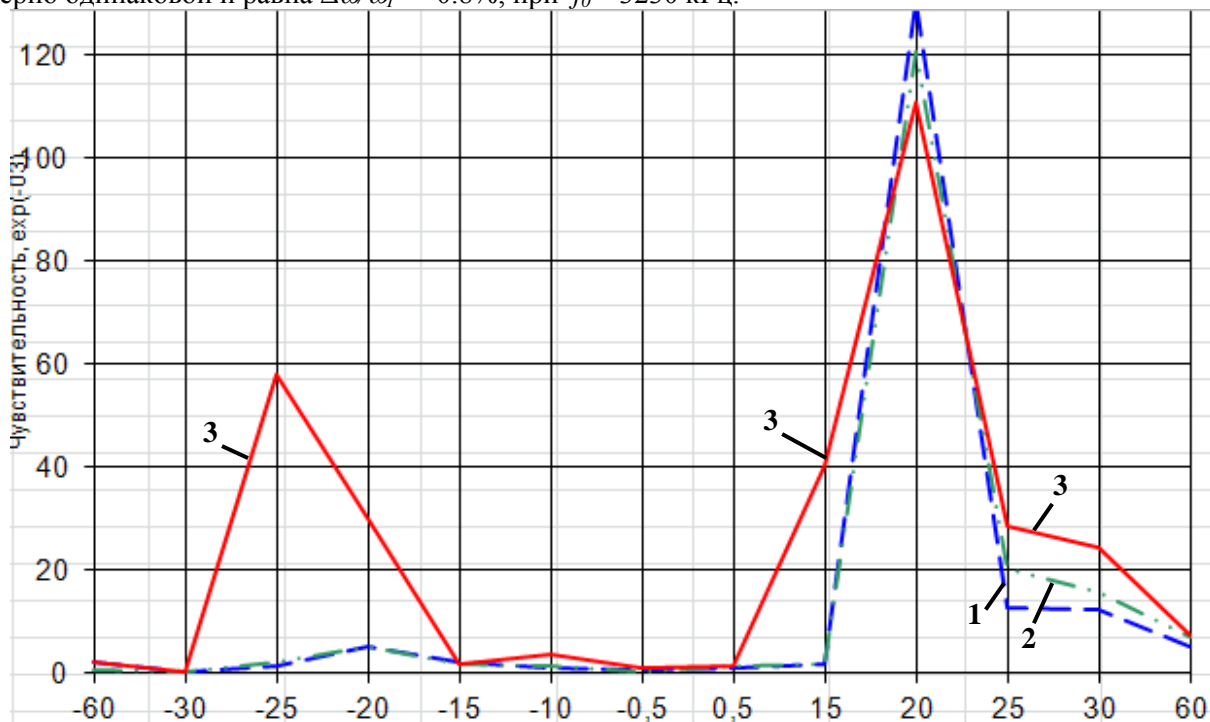


Рис. 5. Зависимость относительного измерения частоты от величины фазового сдвига, вводимого в резонансный контур

Таким образом, путем введения фазовой расстройки контура автогенератора дает возможным создать высокочувствительные приборы для исследования, например, патологических изменений различных видов биотканей живых организмов, в частности, околоносовых пазух.

Схема полного устройства обработки информации применительно для выявления патологии верхнечелюстных пазух приведено на рисунке 6.

Устройство имеет дополнительно кварцевый генератор и смеситель частоты [11].

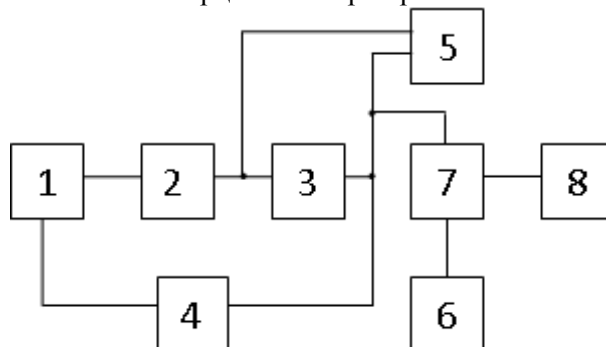


Рис. 6. Структурная схема устройства со смесителем частоты.

где:

- 1, 2, 3, 4 - генератор с фазовым сдвигом;
- 1 – первичный преобразователь (ПП1);
- 2- усилитель,
- 3-регулируемый фазовращатель;
- 4-цепь положительной обратной связи,
- 5-фазометр,
- 6-кварцевый генератор;
- 7-смеситель частоты;
- 8-частотомер.

В данном устройстве разность частот измерительного и опорного генератора определяют разностную частоту смесителя 7, которая измеряется частотомером 8 – фазовая расстройка в контур вводится с помощью фазовращателя 3 и измеряется фазометром 5.

Процесс диагностики производится в три этапа: 1-установка исходного состояния, 2-отстройка от мешающих факторов, 3-диагностика заболевания.

Предварительно установка настраивается в исходное состояние.

В исходном состоянии оба генератора могут иметь разные частоты и на первом этапе производится выравнивание частот обоих генераторов и на выходе измерителя разностной частоты 8 устанавливается:

$$\Delta f = f_1 - f_2 \approx 0, \quad (2.5)$$

где,  $f_1$  - частота колебаний измерительного генератора с фазовым сдвигом, равным 0, при расположении ПП1 в воздухе;  $f_2$  - частота колебаний опорного кварцевого генератора 6.

На втором этапе ПП1 устанавливают на интактный участок поверхности лица. В качестве интактного участка можно выбрать подбородочное возвышение нижней челюсти. Это объясняется тем, что толщина и состав мягких тканей подбородочного возвышения идентичны тканям, покрывающим верхнечелюстные пазухи.

В этом случае, на выходе смесителя частоты 7 регистрируют изменение частоты:

$$\Delta f_2 = \Delta f_1 + \Delta f_M = \Delta f_1 + f_0 [S_x^M (1 - \operatorname{tg} \varphi_0) - S_R^M \operatorname{tg} \varphi_0] \quad (2.6)$$

где

$f_0$  - частота собственных колебаний генератора с фазовым сдвигом, т.е. частота генератора при  $\varphi_0 = 0$ ;

$\Delta f_M$  - изменение частоты колебаний генератора с фазовым сдвигом при расположении ПП1 на интактном участке поверхности лица;

$S_x^M, S_R^M$  - чувствительность соответственно реактивной и активной составляющих (в относительных единицах) ПП1 к мешающим факторам (кожа, подкожная клетчатка, костная ткань и т.п.).

Регулируя угол сдвига фазовращателем, добиваются  $\Delta f_2 = 0$ .

При установлении ПП1 на исследуемую область верхнечелюстной пазухи на выходе измерителя разностной частоты 8 регистрируют приращение частоты:

$$\Delta f_3 = \Delta f + \Delta f_{II} = \Delta f + f_0 \left[ S_x^{II} (1 - \operatorname{tg} \varphi_0) - S_R^{II} \operatorname{tg} \varphi_0 + S_x^M (1 - \operatorname{tg} \varphi_0) - S_R^M \operatorname{tg} \varphi_0 \right] \quad (2.7)$$

где

$S_x^{II}, S_R^{II}$  - чувствительность соответственно реактивной и активной составляющих ПП1 к патологическому содержанию верхнечелюстной пазухи (в относительных единицах);

$\Delta f_{II}$  - изменение частоты колебаний генератора с фазовым сдвигом при расположении ПП1 на исследуемой области верхнечелюстной пазухи.

Далее перемещают ПП1 на интактный участок поверхности лица и посредством регулируемого фазовращателя 3 вводят фазовый сдвиг в контур генератора. Изменяя значение фазового сдвига  $\Delta\varphi$  в пределах от  $+\pi/2$  до  $-\pi/2$  и фиксируя эти значения фазометром 5, добиваются на выходе измерителя разностной частоты 8, получения нулевого значения приращения частоты  $\Delta f_2$ , т.е.  $\Delta f_2 \approx 0$ .

Тогда из выражения 2.6 следует, что

$$S_x^M (1 - \operatorname{tg} \Delta\varphi) = S_R^M \operatorname{tg} \Delta\varphi. \quad (2.8)$$

В случае наличия патологического содержания в верхнечелюстных пазухах, на выходе смесителя наблюдается приращение частоты, которое с учетом формул (2.7.) и (2.8) можно представить в виде:

$$\Delta f = \Delta f_1 + f_0 \left[ S_x^{II} (1 - \operatorname{tg} \Delta\varphi) - S_R^{II} \operatorname{tg} \Delta\varphi \right] \quad (2.9)$$

При отсутствии патологического содержания в пазухе приращение частоты  $\Delta f$  будет близко к нулевому значению.

### 3. Выводы

1. Из теоретических и экспериментальных исследований следует, что выходные характеристики вихретокового преобразователя зависят от электрофизических параметров исследуемого полупроводящего полупространства (содержимого пазухи). В связи с этим представляется возможным дифференцировать вид заболевания пазухи.

2. Наиболее оптимальной с точки зрения получения высокой чувствительности и достоверности является измерительная схема включения вихретокового преобразователя, реализующая частотно-фазовый способ обработки измерительной информации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зиновьева Л.А. Определение степени наполнения органов или участков тела человека на разных глубинах методом вихревых токов: Автореф. дис. канд. техн. наук. - Томск, 1983. - 25с.
2. Вотяков В.Ф., Давиденко Д.М., Александров А.А. Исследование взаимодействия электромагнитного поля индуктивного преобразователя с биологической средой // Современные техника и технологии: Труды VI Междунар. научно-практ. конф. молодых ученых. - Томск: 2000. - С.118-119.
3. Вотяков В.Ф., Ломакин А.А., Александров А.А. Анализ реакции полупроводящей биосреды на "емкостной" преобразователь // Современные техника и технологии. - Томск: 2000. - С.120-121.
4. Вотяков В.Ф., Храпачев Д.М., Александров А.А. Теоретическое исследование выходных характеристик вихретокового преобразователя, расположенного над полупроводящей биосредой. // Современные техника и технологии: Труды VII Междунар. научно-практ. конф. молодых ученых. - Томск: 2001. - Т.1. - С.153-155.
5. Захаров Б.Б. Датчики электропроводности. - М.: Наука, 1979. - 156с.
6. Пресман А.С. Электромагнитные поля и живая природа. - М.: Наука, 1968. - С.288.
7. Шилов М.В., Берентаев Е.Б., Вотяков В.Ф. Метод и аппаратура для диагностики воспалительных заболеваний верхнечелюстных пазух // Современные техника и технологии: Труды IV Областн. конф. молодых ученых. - Томск: 1998. - С.85 - 86.

8. Вотяков В.Ф., Нестеров А.М., Лебедев А.В., Александров А.А. Частотно-фазовый метод исследования полупроводящих биологических сред//Контроль, измерения, информатизация: Материалы Междунар. науч.-техн. конф. - Барнаул: 2000. - С.121-123.

9. Вторушина К.А., Вотяков В.Ф., Александров А.А, Вихретоковое устройство для выявления патологии верхнечелюстных пазух. // Современная техника и технологии :Труды XIV Междунар. конф. молодых ученых . - Томск: 2008 Т.1.- С.458-459.

10. Свид. на полезн. модель 53129 Россия (51) МПК А61В 5 00. Устройство для диагностики патологии верхнечелюстных пазух/ А.В. Староха, А.А. Александров, М.В. Шилов, В.Ф. Вотяков, Д.В. Миляев. Заявлено 03.11.2005; Опубл.10.05. 2006, Бюл. №. 13.- С.5. ил.1.

11.Миляев Д.В., Панасюченко А.М. Исследование схемы дефектоскопа с параметрическим датчиком, включенным в колебательный контур генератора. Томск: Сб. Известия ТПИ, Т. 221, - С.3.

12. Миляев Д.В., Нестеров А.М. Исследование автогенераторных схем для многопараметрового контроля качества продукции. Сборник «Электронные и электромагнитные устройства в измерительной технике» /Под ред. Ю.В.Селезнева, 1982, - С.4.

**Сведения об авторах:**

**Миляев Д.В.:** доцент кафедры информационно-измерительной техники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Адрес: 634034, Томск, пр. Ленина 2, 10 корпус ТПУ, тел. (3822) 41-89-11.

Область научных интересов: разработка методов и средств неразрушающего контроля и измерения (металлообнаружителей, измерителей больших сопротивлений, приборов медицинской диагностики). E-mail: mdv@tpu.ru

**Вотяков В.Ф.:** доцент кафедры Информационно-измерительной техники Национального исследовательского Томского политехнического университета. E-mail: kamese@tpu.ru.

Адрес: 634034, Томск, пр. Ленина 2, 10 корпус ТПУ, раб. тел. (3822) 41-89-11

Область научных интересов: медицинское приборостроение

**Староха А.В.:** зав. кафедрой оториноларингологии ГОУ ВПО «Сибирский государственный медицинский университет Росздрава», директор Томского филиала ФГУ «Научно-клинический центр оториноларингологии ФМБА России», профессор, д-р мед. наук, засл. врач РФ. Р..

Адрес: 634034, Томск, ул. Нахимова 3, ЛОР-клиника, раб. тел. (3822) 41-72-70

Область научных интересов: реконструктивная хирургия лицевого черепа, эндоскопическая эндоназальная ринохирургия, микроринохирургия основания черепа, хирургическое лечение тугоухости, кохлеарная имплантация.

УДК 004.31

**ОПТИМИЗАЦИЯ АППАРАТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ  
КАРДИОЛОГИЧЕСКИХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ  
(HARDWARE OPTIMIZATION OF CARDIOLOGY DIAGNOSTIC AUTOMATIC  
COMPLEXES)**

А.В. Кайгородов, А.Г. Якунин  
A.V. Kaigorodov, A.G. Yakunin

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова  
г. Барнаул

E-mail: yakunin@agtu.secna.ru, zkapod@gmail.com

В ходе исследования были рассмотрены различные варианты технической реализации кардиологических комплексов и показана эффективность применения при их разработке многокритериальной оптимизации по таким критериям, как: цена, количество функциональных блоков, площадь, энергопотребление. (Classifications of cardiology apparatuses was assigned in the course of research and multiobjective optimization was conducted in various criteria such as cost, quantity of functional assemblies, amount of area, power consumption.)

**Ключевые слова:**

Кардиология, ЭКГ, аппаратное обеспечение, многокритериальная оптимизация, анализ.  
(Cardiology, ECG, hardware, multicriteria optimization, analysis.)

Бурное развитие кардиологии за последние 2-3 десятилетия во многом обусловлено разработкой и широким внедрением в клиническую практику новых, в том числе и электрокардиографических, методов исследования. Электрокардиография относится к информативным и наиболее распространенным методам обследования больных с заболеванием сердца. ЭКГ дает возможность также диагностировать заболевания и синдромы, требующие неотложной кардиологической помощи. [1]

Современная электрокардиография располагает большим выбором средств системного (компьютерного) анализа. Применение таких средств в электрокардиографической диагностике позволяет проводить цифровую обработку и картирование биоэлектрических потенциалов сердца [2].

При конструировании приборов данной категории разработчику приходится решать целый ряд оптимизационных задач, связанных с необходимостью рационального сочетания в создаваемом устройстве зачастую достаточно противоречивых экономических, эргономических и технических требований, обусловленных, в частности, такими факторами, как:

- высокая стоимость элементной базы для обеспечения малых габаритов, низкого уровня шумов и помех устройства и его низкого энергопотребления;
- необходимость минимизации массы и габаритов мобильных устройств при одновременной минимизации стоимости их производства;
- востребованность устройств автоматизированной кардиодиагностики, способных работать с простейшими средствами вычислительной техники (нетбуками, смартфонами, неттопами и планшетами) и невозможность (либо сложность) реализации на таких устройствах расширенных функциональных возможностей и современных методик обработки данных, требующих больших вычислительных ресурсов.

Так, прибор, обладающий большей ценой, будет менее востребован на рынке кардиомониторов. Малые габариты и вес, а также пониженное энергопотребление, которое бы позволило дольше работать от аккумулятора, важны для портативных устройств.

Очевидно, что в процессе конструирования разработчик у потребует сначала выбрать структурную и функциональную схему устройства, затем определиться с компонентной базой, и лишь затем составить электрическую принципиальную схему кардиокомплекса, проработать конструкцию устройства, и лишь затем разработать и отладить для него программное обеспечение.

В целом структура аппаратно-программных комплексов для исследования ЭКГ одинакова у разных производителей (рисунок 1). Поскольку же их электрические характеристики определяются требованиями действующих стандартов к электрографической аппаратуре, то это обуславливает весьма сходные параметры практических всех имеющихся на рынке систем.

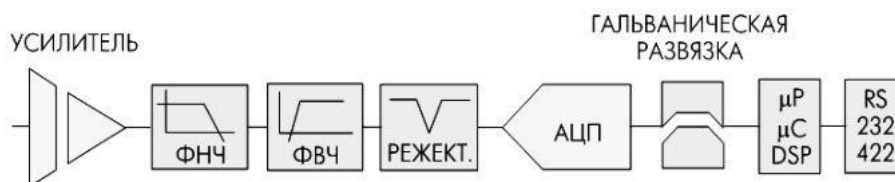


Рис. 1. Типичная структурная схема электрокардиографа [4]

Следует заметить, что рынок подобной наукоемкой продукции переполнен невостребованными образцами электрофизиологической аппаратуры и программно-технического обеспечения, предназначенного для проведения ЭКГ-диагностики. При этом превалирует продукция импортного производства и, как правило, сомнительного качества.

До недавнего времени построение кардиологических комплексов велось на базе измерительных усилителей различных производителей [8,9,10]. Фактически, приходилось устанавливать один измерительный усилитель на канал, что, соответственно, вело к повышению стоимости кардиологических комплексов. Однако в ноябре 2011 года компанией Texas Instruments была предложена новая платформа для устройств данной категории [11,12]. Микросхемы серии ADS119x, ADS129x представляют собой фронтэнд для кардиографии. Их сравнительные характеристики представлены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительные характеристики фронтэндов для кардиографии

|   | ADS1194      | ADS1196      | ADS1198      | ADS1294      | ADS1296      | ADS1298      |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Разрешение, бит                         | 16           | 16           | 16           | 24           | 24           | 24           |
| Количество каналов                      | 4            | 6            | 8            | 4            | 6            | 8            |
| Количество выборок (kSPS)               | 8            | 8            | 8            | 32           | 32           | 32           |
| Интерфейс                               | Serial SPI   | Serial SPI   | Serial SPI   | Serial SPI   | Serial SPI   | Serial SPI   |
| Аналоговое напряжение (Минимальное), В  | 2.7          | 2.7          | 2.7          | 2.7          | 2.7          | 2.7          |
| Аналоговое напряжение (Максимальное), В | 5.25         | 5.25         | 5.25         | 5.25         | 5.25         | 5.25         |
| Архитектура АЦП                         | Сигма-Дельта | Сигма-Дельта | Сигма-Дельта | Сигма-Дельта | Сигма-Дельта | Сигма-Дельта |

При этом цена, заявленная производителем, находится в пределах стоимости одного измерительного усилителя, что делает данные фронтэнды отличным решением для реализации множества различных недорогих устройств. Однако, возникает проблема доступности данных специфичных микросхем, т.к. они имеют ограниченную область применения. На рисунке 2 представлена структурная схема ADS1198.

Данный модуль состоит из мультиплексора MUX, от 4 до 8 (в зависимости от модели) дифференциальных усилителей PGA (Program Gain Amplifier) с программируемым коэффициентом усиления [11,12]. Кроме того, есть возможность установки внешнего источника тактового сигнала частотой от 0,5 до 2,25 МГц.

Преимущества такого модуля очевидны – нет необходимости разрабатывать отдельный модуль усиления и выбирать внешний АЦП, т.к. всё находится на одном кристалле и достаточно небольшой обвязки и контроллера с поддержкой SPI для начала работы с этим модулем. Недостатки этого модуля в том, что он фактически ограничивает возможности аналоговой фильтрации, перенося все возможности фильтрации на цифровые фильтры, что, с



одной стороны, упрощает задачу фильтрации, с другой же стороны, добавляет требования к вычислительным мощностям устройства, обрабатывающего поступающие данные.

Однако на сегодняшний день традиционным решением пока еще остаётся использование систем с отдельными усилителями и АЦП. В схемотехнической реализации их входных аналоговых цепей применено традиционное для подобных систем решение – измерительный (инструментальный) усилитель (IA) и операционный усилитель обратной связи, выход которого подключен к правой ноге пациента. В качестве инструментального усилителя применяют AD620 – недорогой усилитель с высокой точностью и превосходными характеристиками на постоянном токе (коэффициент ослабления синфазного сигнала CMR >> 100 dB на частотах вплоть до 1 кГц, смещение на входе не более 50 мкВ, малый входной ток -1 нА макс., и низкое напряжение шума: 0,28 мкВ в полосе 0,1...10 Гц) [3], либо его гораздо более дорогостоящий аналог с чуть меньшим уровнем приведенного шума – инструментальный усилитель INNA 114. Для таких усилителей требуется единственный внешний резистор  $R_g$ , задающий коэффициент усиления. Коэффициент усиления рассчитывается следующим образом [10]:

$$G = \frac{49.4k\Omega}{R_g} + 1$$

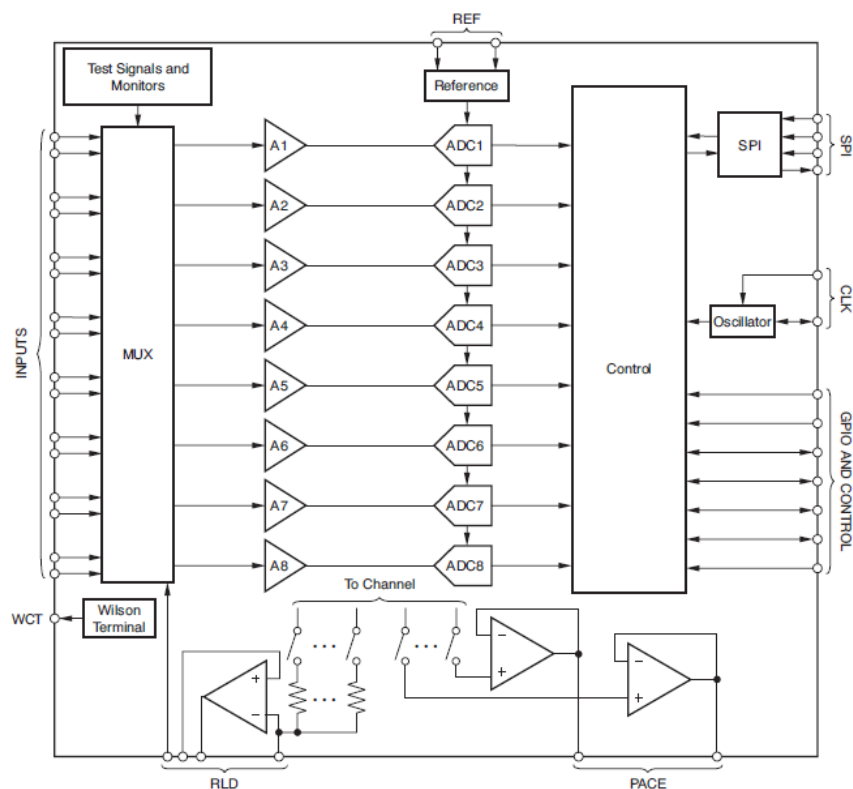


Рис. 2. Структурная схема модуля кардиографии ADS1198 [3]

Для того, чтобы избежать насыщения выхода, коэффициент усиления установлен таким, чтобы размах выходного напряжения соответствовал максимальному, если на входе присутствует максимальное расчетное напряжение сигнала. При напряжении питания  $\pm 5$  В размах выходного напряжения ИС AD620 составляет  $\pm 3,8$  В; тогда при входном сигнале  $\pm 5$  мВ и при возможном постоянном смещении  $\pm 300$  мВ расчетный коэффициент усиления составит около 12,45[3].

Аппаратное обеспечение таких приборов, в свою очередь, имеет отличительную особенность: производители решают проблемы снятия и фильтрации сигнала путём наименьшего сопротивления, устанавливая в приборы АЦП большой разрядности. Однако, такое решение является совсем не обязательным и не самым лучшим, если подойти к процессу дискретизации и обработки сигнала с позиции методов многокритериальной оптимизации.

Так, в основе дискретизации континуальных сигналов лежит принципиальная возможность представления их в виде взвешенных сумм

$$U(t) = \sum_j a_j f_j(t),$$

где  $a_j$  - некоторые коэффициенты или отсчеты, характеризующие исходный сигнал в дискретные моменты времени;  $f_j(t)$  - набор элементарных функций, используемых при восстановлении сигнала по его отсчетам. Наиболее распространенной формой дискретизации является равномерная, в основе которой лежит теорема отсчетов[5]. Согласно этой теореме в качестве коэффициентов  $a_j$  следует использовать мгновенные значения сигнала  $U(t_j)$  в дискретные моменты времени  $t_j=j\Delta t$ , а период дискретизации выбрать из условия

$$\Delta t = 1/2 \cdot F_m$$

где  $F_m$  - максимальная частота спектра преобразуемого сигнала. При этом выражение (1) переходит в известное выражение теоремы отсчетов

$$\sum_{j=-\infty}^{\infty} \frac{U(j\Delta t) \text{Sin}[2\pi F_m(t - j\Delta t)]}{2\pi F_m(t - j\Delta t)}$$

Для сигналов со строго ограниченным спектром это выражение является тождеством [5].

Следует отметить, что спектры разных реальных сигналов фактически бесконечны, и применение дискретизации ограниченной частоты может привести к искажению информации. Поэтому предлагается для уменьшения обусловленных дискретизацией искажений сигнала из-за эффекта наложения спектра, сохранять с тракте аналоговой обработки полосовой фильтр для выделения полезного сигнала ЭКГ и подавления ВЧ шумов, однако, для снижения аппаратных затрат, его добротность может быть совсем небольшой. Поскольку основной полезный сигнал лежит в диапазоне 0,01-100 Гц, то после его фильтрации и «отсечки» дрейфа НЧ- компоненты для его преобразования не потребуется высокой частоты дискретизации и большого числа разрядов. При этом, при использовании экранированных отведений, на выходе тракта аналоговой обработки получается достаточно «чистый» сигнал ЭКГ, что даёт возможность использовать АЦП, непосредственно встроенные в микроконтроллер, а не устанавливать сторонние микросхемы-преобразователи (что сказывается на цене конечного устройства). При этом дополнительный ФВЧ и ФНЧ с крутой частотой среза и высокодобротный режекторный фильтр можно реализовывать уже цифровыми, а не аналоговыми способами. Так, устанавливая фильтр Саллена-Кея второго порядка, можно добиться ослабления сигнала на уровне 1кГц до -30dB.

Множество микроконтроллеров имеют встроенный АЦП. Это и поколение контроллеров Mega от компании Atmel, и PIC контроллеры производства Microchip Technology Inc. Однако, по ряду причин (недостаточное количество разрядов и слишком большое время преобразования входного сигнала) они не удовлетворяют предъявляемым для трактов обработки ЭКГ- сигналов требованиям. Современные же AVR-микроконтроллеры семейства XMEGA имеют один или два восьмиканальных аналоговых порта (PORTA, PORTB), каждый из которых содержит один модуль быстродействующего 12-разрядного аналого-цифрового преобразователя. Этот созданный разработчиками XMEGA модуль является для платформы AVR 8-bit RISC новым и представляет несомненный и значительный шаг вперед. Его параметры и набор функций неплохо смотрятся на фоне многих других встроенных АЦП у 8-разрядных и 16-разрядных микроконтроллеров для встраиваемых приложений, и даже некоторых внешних АЦП, разрабатываемых фирмой Analog Device.

В АЦП XMEGA используется метод последовательного приближения (SAR), при котором код результата преобразования формируется последовательно бит за битом, начиная со старшего разряда (MSB). Программным способом может устанавливаться один из двух вариантов разрядности АЦП — 8 или 12 бит [6,7]. Максимальная частота дискретизации АЦП составляет 2 миллиона выборок в секунду [6, 7]. Однако, для получения качественного и точного результата время преобразования составляет 3,5 мкс [6], что соответствует примерно 280 тысячам выборок в секунду. Структурная схема АЦП показана на рисунке 3.

Анализируя его характеристики, можно прийти к выводу, что производительности АЦП, встроенного в микроконтроллер XMEGA, вполне достаточно для реализации кардиографа с небольшой погрешностью. Поскольку одновременно АЦП может преобразовывать лишь один канал, а общее число подаваемых на вход мультиплексора ЭКГ – сигналов равно 8, то при времени преобразования 3.5 мкс частота дискретизации составит около 280 кГц, или, в

пересчете на 1 канал, 35 кГц. Учитывая, что полезный сигнал, как уже отмечалось, лежит преимущественно в диапазоне 0-100 Гц, данной частоты вполне достаточно для оцифровывания, а 12 разрядов достаточно для получения точного графика кардиограммы.

Используя 12-ти разрядный АЦП, мы получаем  $2^{12} = 4096$  различных состояний, а на уровне 2В погрешность преобразования составляет  $2/4095 = 0,4$  мВ, что является вполне приемлемым решением для преобразования сигнала.

Таким образом, на сегодняшний день приведенная на рисунке 1 обобщенная схема может быть реализована в трех вариантах исполнения ЭКГ - каналов:

- канал, в котором каждый из основных блоков (усилитель, АЦП, фильтры) выполнены в виде отдельных функциональных модулей;
- канал с внешним блоком усиления, внешним фильтром и встроенным в микроконтроллер АЦП;
- канал в интегральном исполнении, когда блок усиления, ФНЧ и АЦП размещается на одном кристалле.

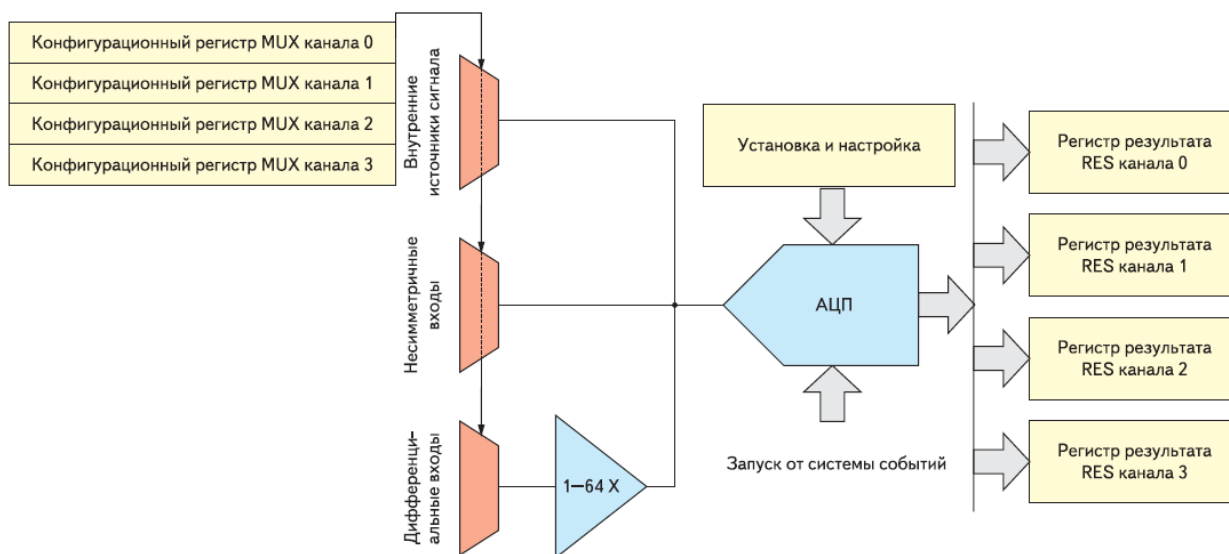


Рис. 3. Принцип работы АЦП в XMEGA.

Если каждый из вариантов реализации ЭКГ – каналов обозначить за  $x_i$ ,  $i=1..3$ , то общее множество возможных решений для технической реализации кардиокомплекса можно представить как  $X=\{x_1, x_2, x_3\}$ .

Оценим данное множество по таким критериям  $Y_j$ , как:

1. стоимость конечного устройства,
2. габариты конечного устройства,
3. количество внешних блоков,
4. энергопотребление.

В общем виде каждый из этих критериев  $Y_j$  функционально связан с технической реализацией  $x_j$  выражением:

$$Y_j = f_j(x_i), \quad (1)$$

и образует в пространстве решений многомерную функцию  $Y=\{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4\}$ , где  $j=1..4$  – индекс, соответствующий одному из четырех вышеперечисленных критериев,  $f_j$  – функция, отображающая множество  $X$  координату  $Y_j$  множества решений  $Y$ .

Анализируя цены, указанные в каталогах на сайтах производителей, а также учитывая, что каждый из комплексов имеет 8 каналов, можно составить среднюю стоимость прибора, основанного на материальной базе, соответствующей каждому из вариантов  $x_i$ . При расчетах учитывалась труднодоступность приобретения модуля ADS1194 в России, а также неоправданное завышение на него цен посредниками, продающими эту микросхему на территории РФ. Сравним критерии  $Y_2$ ,  $Y_3$  с критерием  $Y_1$  (цена). Для анализа полученного решения рассмотрим его проекции на различные орты множества пространства решений  $Y$ .

Так, на рисунке 4 показан образ  $Y$  в проекции на оси  $Y_1$ , (цена устройства)  $Y_3$  (количество внешних блоков).

Очевидно, что чем больше блоков будет вынесено в отдельные модули, тем выше будет цена конечного устройства. Использование интегрированных решений (например, АЦП, встроенных в микроконтроллер) позволяет уменьшить стоимость прибора, но, в таком случае, предъявляются большие требования к предварительной фильтрации сигнала. Это необходимо потому, что разрядность АЦП, встроенного в микроконтроллер, как правило, меньше, нежели разрядность внешних модулей АЦП.

На рисунке 5 отображена зависимость между стоимостью конечного устройства и его габаритами.

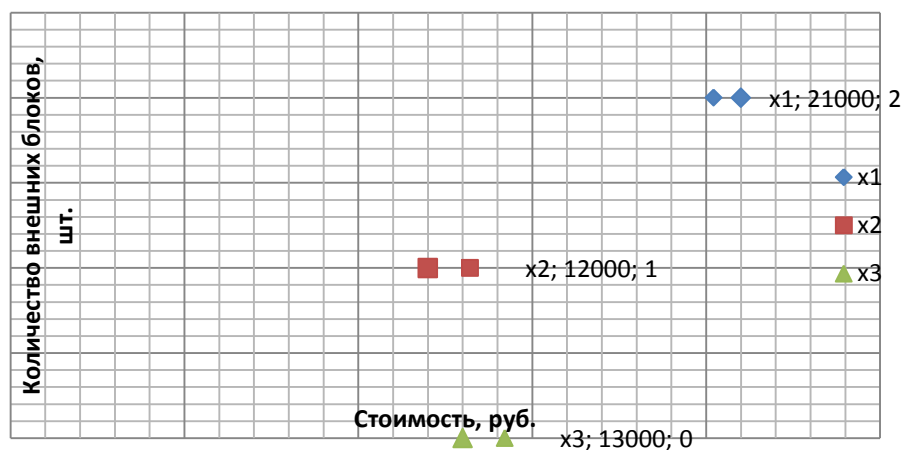


Рис. 4. Зависимость между стоимостью конечного прибора и количеством внешних блоков, использованных в нём.

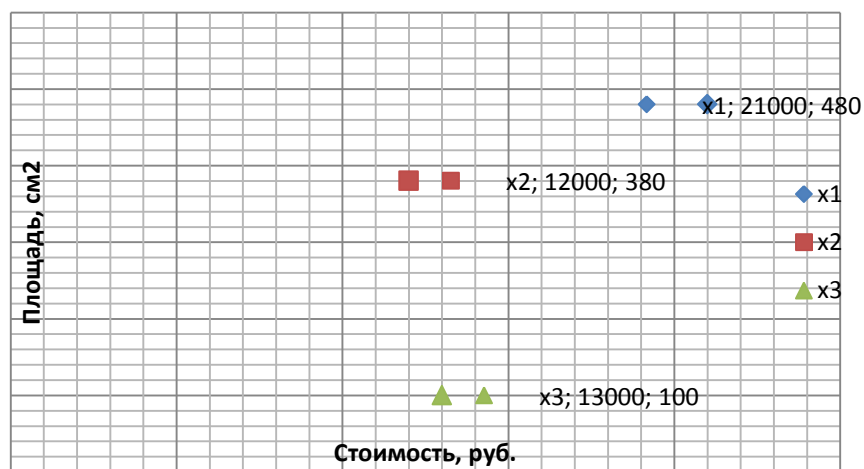


Рис. 5. Зависимость между стоимостью конечного прибора и площадью устройства.

Использование современной элементной базы позволяет минимизировать токопотребление устройства почти без увеличения его цены, что отображено на рисунке 6. Для значения  $x_3$ , соответствующего современным микросхемам семейства ADS119x/ADS129x, этот показатель минимален, что очень выгодно для портативной техники, где важно время работы от аккумулятора. Это позволяет использовать менее мощные аккумуляторы, которые легче и используют меньше места.



Рис. 6. Зависимость между стоимостью конечного прибора и токопотреблением.

Как видно из приведенных рисунков, при поиске  $\min (f_1(x_1), \dots, f_1(x_3)); \dots \min (f_4(x_1), \dots, f_4(x_3))$  создаются похожие образы множества  $X$ . При этом только образ подмножеств  $x_2$  и  $x_3$  является Парето – оптимальным, тогда как решения для  $x_1$  не обеспечивают минимума ни по одному из критериев. Это объясняется тем, что, только сокращая количество внешних узлов в кардиологическом комплексе, можно добиться сокращения стоимости конечного продукта. Благодаря уменьшению количества таких узлов уменьшается количество занимаемой площади устройством и снижается его стоимость. Поэтому на данный момент наиболее перспективным способом построения кардиологических комплексов является построение устройств на одном кристалле или на контроллере с интегрированным АЦП, что позволяет создавать миниатюрные приборы с широким функционалом, низким энергопотреблением и простотой в обслуживании. Такие устройства должны прийти на замену устаревающим кардиологическим комплексам на базе сложных многоуровневых схем.

А вот выбор между решениями 2 и 3 зависит от области применения устройства, поскольку в данном случае улучшение технических показателей устройства влечет за собой увеличение его стоимости. В частности, поскольку габариты и вес доминируют при разработке мобильных диагностических комплексов, например, таких как монитор Холтера, для их построения можно рекомендовать применение фронтэндов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суворов А.В. Клиническая электрокардиография. – Нижний Новгород. Изд-во НМИ, 1993.
2. Бондаренко А.А. Проблемы современной электрокардиографии // Медицинская техника, №6, 2003.- С.36-39.
3. Автоматический анализ ЭКГ: проблемы и перспективы // Здоровоохранение и медицинская техника, №1, февраль, 2004.
4. Компани-Бош Э., Хартманн Э. Электрокардиограф на базе микроконвертора // Компоненты и технологии, №6, 2004.- С.104-108.
5. Ширяев В.В. Компьютерные измерительные средства (КИС): Учебное пособие
6. Atmel Corporation. XMEGA A1U datasheet. - San Jose, CA, 2012.
7. Аналогово-цифровой преобразователь // Компоненты и технологии, №6, 2008.-85-89.
8. Texas Instruments. INA128 Datasheet. – Dallas, Texas, 2005.
9. Maxim Integrated Products. MAX4194 Datasheet. - Sunnyvale, CA, 2009.
10. Analog Devices, Inc. AD620 Datasheet. – 2009.
11. Texas Instruments. ADS1194 Datasheet. – Dallas, Texas, 2011.
12. Texas Instruments. ADS1294 Datasheet. – Dallas, Texas, 2012.

**Сведения об авторах:**

**Кайгородов А.В.:** г.Барнаул, Алтайский гостехуниверситет, студент, сфера научных интересов - медицинское приборостроение.

**Якунин А.Г.:** г.Барнаул, Алтайский гостехуниверситет, д.т.н., профессор, зав.каф., сфера научных интересов - информационно-измерительные системы и АСУ ТП.

УДК

## ACTUAL APPROACHES FOR - MULTICAST-BASED RELIABLE DATA TRANSPORT AND THEIR DEFICIENCIES

A.Bakharev; E.Siemens

Siberian State University of Telecommunication and Informatics Sciences (SibSUTIS)

630102 Russia, Novosibirsk Kirova street 86

Anhalt University of Applied Sciences (HSA)

06366 Germany, Köthen Bernburger Str.57

E-mail: a.bakharev@emw.hs-anhalt.de; e.siemens@emw.hs-anhalt.de

This paper describes the state of the art of reliable multicast data transport in the light of contemporary changing Internet technology requirements. Emerging cloud computing applications, distributed workflows with massive data transport demands and global services infrastructures require novel approaches in field of content distribution. So global infrastructures, like *Akamai CDN* require optimization of data transmission means across its networks. Multicast can potentially bring significant improvements in content distribution technologies - e.g. optimization of bandwidth utilization and improvement of interactivity. In this paper an overview of currently widely used multicast approaches is given along with the performance and usability constraints in its usability in contemporary CDN and cloud computing environments. A general overview of some additional protocols is given, which appear as a good basis for further work on multicast, but which are not yet ready to use widely. Also, new ideas for improvement and new investigation directions in reliable multicast approaches are proposed. Finally, most significant topics, at which improvements in the reliable multicast data transport have to be applied and three main issues are pointed out – there are: congestion control, offering of pure *time-bounded reliability* and an efficient sending and receiving buffer management for multicast protocol stacks.

### Key words:

#### 1. Multicast networking

Originally, IP multicast protocols have been designed as pure unreliable data transport solutions and were first standardized in 1986 [1]. One of the first worldwide unreliable multicast implementations was *Mbone* [2] with its affiliated stack of IP multicast protocols like IGMP, PIM, released in early 1990s. These protocol family fit pretty well needs of applications like multimedia conferencing, messaging and real time loss-tolerant applications. For a long time it was the only approach of multicast applications.

With rapid expansion of the internet community and the emergence of grid applications and later on cloud services, requirements for one-to-many networked data transport solutions, usually based on multicast, have caused a focus change of multicast data transport solutions. In these use cases users expect to get a high quality service within online conferences and presentations, high data rates while content distribution and essentially a bitwise copy of source data at each destination of the multicast tree. All these aspects assume existence of reliable transport, which was not proposed in multicast field for a long time. However, the unreliable approaches didn't fit these requirements. As shown in [3] three types of reliability are actually required:

- **Total reliability**
- **Semi-reliability**
- **Time-bounded reliability**

Total reliability assumes that 100% of sent data will be delivered to all recipients and no one bit will be loosed. Hereby, the order of data transmission and delay as jitter of end-to-end data transport is irrelevant. This approach works pretty well in the area of file transport.

Semi-reliability offers retransmission of some of missed packets in combination with *Forward Error Correction* (FEC). As described in RFC 5740 [4], sender will determine critical erasure-filling needs for each sent block of data. Then, if sender will decide that error could be smoothed with FEC redundant blocks, FEC will be applied in reply to e.g. NACK. If error has too massive character, additionally block retransmission will be performed.

Time-bounded reliability is a specific type of reliability which is suitable for applications with strict jitter requirements. In this case, retransmissions have to be performed within certain, strictly bounded retransmission window, since the end-to-end delay or jitter must not exceed some pre-defined bounds. Examples for application with time-bounded reliability is online video streaming, online news release or and real-time text applications like one used to provide summary of quotations on the stock exchange trading. All these applications deal with information which is valuable only in a very short time range.

Reliability in multicast data transport can be offered and initiated by sender or receiver. So, in general reliable multicast protocols can be classified into *sender-initiated* and *receiver-initiated* multicast reliability. In the first class, the transport layer is dealing with acknowledgements (ACKs) being sent by the receiver as reply on each successfully received packet. It causes a problem, named ACK implosion, when continuous stream of ACKs locks the network up. In order to overcome this problem, receiver-initiated protocols have been proposed. In this case, reliability is based on negative acknowledgements (NACKs) instead of ACKs. Here, a reliable multicast receiver notifies the sender not about successfully received packets but only about missed ones. This significantly decreases intensity of service traffic within entire network and prevents against the implosion effect caused by the ACK flooding. The transition to receiver-initiated multicast reliability leads to a new challenge of NACK-based repair efficiency. In fact, it assumes buffering of NACKs on the sender site in order to find out the most optimal retransmission way. Calculation of this optimal time is still one of the actually most significant reliable multicast networking challenges, as discussed in RFC 3269 [5].

## 2. NACK-Oriented Reliable Multicast (NORM)

The *NORM* protocol is described within RFC 5740 [4] in year 2009. The source code of a reference implementation of *NORM* is maintained by the Naval Research Laboratory. The protocol is based on NACKs, so it is a receiver-initiated reliable multicast protocol. It is fully compatible with both IPv4 and IPv6 and offers ready-to-use application, which can be compiled from available source code. The *NORM* application, based on typical UDP sockets offers features like TCP friendly congestion control which provides fair sharing of available bandwidth between multiple data streams. *NORM* can also be used in conjunction with FEC, which is actually an on-demand feature. The FEC usage represents *semi-reliability*, described above. If switched on, *NORM* sends redundant symbols in reply to NACK or within data stream itself, accordingly to chosen option.

*NORM* source code provides a very flexible application programming interface (API) for networked applications development based on reliable multicast. It operates with four levels of instances: API initialization, Session Creation and Control, Data Transport, API event notification.

The packet loss recovery algorithm of *NORM* is quite tolerant to RTT in the network, but very sensitive to packets losses. Fig. 1 represents dependency of data rate on RTT and packet loss for *NORM*. Hereby, as well as in the following measurement results, the testbed was represented by one server and three recipients. Data were transmitted via a 1 Gbit-Ethernet with emulated network impairments like packet loss and jitter as well as transmission delay. Emulation was done using a *Netropy 10G* impairment emulator. The overall amount of transmitted data was in all tests 10 GBytes.

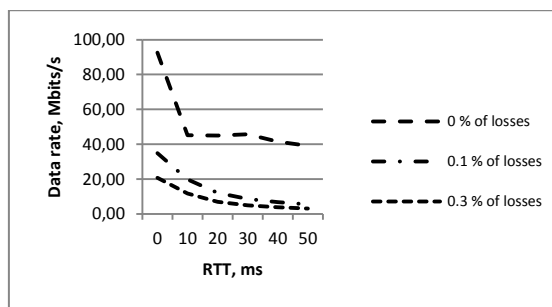


Fig. 1. Dependency of *NORM* data rate on RTT and packet losses



### 3. UDP-based file transfer protocol with multicast (UFTP)

*UFTP* is a reliable multicast protocol as well as correspondent end-user application and can be considered as a successor of *Starburst Multicast FTP (MFTP)* [6] proposed in 2004 and offering reliable multicast file transfer by means of typical UDP transport. The protocol is currently in use in production of the Wall Street Journal to send WSJ pages over satellite to their remote printing plants [7].

*UFTP* uses specific scheme of data transmission organization. First of all, the protocol decides how to divide input data set. It is going to be divided by blocks (one block is always sent within one UDP packet), while blocks, in turn, going to be grouped into sections. Afterwards, the sender just sends a section to multicast group. As soon transmission of a section is finished, the sender requests current status of received data from each multicast receiver and gets a batch of NACKs from recipients. On reception of all NACKs, missed blocks are retransmitted in a unicast way. A new section will begin only after the reception of all blocks of the previous section at each recipient in the multicast group. Such data transmission organization leads to significant increase of protocol performance compared to *NORM*. Data rate evaluation results for the same testbed as for *NORM*, showcased at Fig. 2.

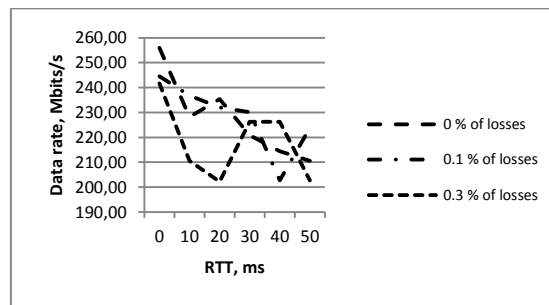


Fig. 2. Dependency of *UFTP* data rate on RTT and packet losses

Obtained results reveal that *UFTP* is quite loss tolerant protocol and recovery of lost packets does not lead to significant reduction of the overall data rate as *NORM* does. However, in both cases, a significant data rate reduction with an increased RTT can be observed.

### 4. Pragmatic General Multicast (PGM)

The *PGM* protocol is described within RFC 3208 [8]. This protocol has been developed with the ultimate goal to provide reliable data transmission service for as many recipients as possible. This design focus leads to the necessity to dispense with ACKs in favor of NACKs, while using ACKs as a mechanism of reliability significantly reduces scalability of end application and entire protocol due to the well-known problem with ACK implosion. *PGM* provides *time-bounded reliability*. Time-bounded reliability assumes reliability within some certain retransmission window. The retransmission window has to be defined by the user within the configuration of the reliable multicast session. As an option, window size can be configured for automatic adjustment based on NAK-silence. *PGM* operates over classic IP multicast stack and does not deal with group management and delegates this tasks directly to IGMP, while previously described protocols deal with group instances on themselves and are able to manage it. So, it works as superstructure (in form of raw socket), over UDP and IP multicast. Since *PGM* is intended to operate with a time-bounded reliability, it accelerates sending of NACKs as much as possible in order to get rid of unrecoverable losses.

An open source implementation of *PGM* is *openPGM*, which in fact is a framework for development of new reliable multicast applications. *openPGM* does not provide a ready-to-use application, however it gives a lot of development opportunities. Since any performance evaluation within this paper has been performed with ready-to-use applications, performance results haven't been compiled in the same lab environment. Instead, we use the performance results, presented in the press release of *MIRU development studio* [9]. According to this, *openPGM* test application offers a maximum sustained data rate of about 540 Mbits/s on a shortcut - without network delay and packet

loss and jitter. Investigation of the behavior of openPGM in presence of packet losses and high packet delay is subject to further work of our group.

## 5. Other approaches and protocols

Some other contemporary approaches besides the described ones are also to be mentioned. Of interest is *Reliable Data Center Multicast (RDCM)* [10], proposed by Microsoft Research Asia. It offers reliable multicast service for local environments with high link density and so predestined for extended local area network environments (e.g. data centers and metro nets). Non-typical feature of *RDCM* is ability to organize retransmissions of missed packets by means of neighbor recipients. This feature in fact causes a strict requirement regarding the link density – so the receivers must be located geographically close to each other. Interesting approach in *RDCM* is that acknowledgments are sent over multicast in order to notify each member about missed packet and to find out, which intermediate of a particular end node (recipient) has to retransmit missed data to recipient by means of unicast, in turn. This protocol is not available as open source project, so there was no ability to test it in own lab environment.

Another solution is *Reliable Overlay Multicast with Loosely Coupled TCP Connections (ROMA)* [11], proposed by Boston University. *ROMA* uses a concept, which fundamentally differs from the abovementioned solutions. It deals with TCP instead of UDP, some performance measurements results are published in [11]. Bandwidth of *ROMA*, in accordance with tests, performed by inventors, is not more than 98 Mbits/s. This protocol is also not available publically, so it could not be tested in here.

The *Scalable Reliable Multicast* framework (*SRM*) [12], proposed in year 1995 and proved as a protocol for serving light-weight reliable multicast sessions, like networked whiteboard application. This approach is out of interest here, since it initially has been designed as a solution for maintaining of light-weight sessions with all consequences like focus on huge number of recipients instead of achieving high data rates.

One more approach is the *Reliable Multicast Transport Protocol (RMTP)* [13] proposed by *Alcatel-Lucent*, which assumes to have a set of intermediate designated receivers across the network in order to minimize probability of ACKs implosion. *RMTP* proposed in year 1997 and not maintained any more for about a decade.

## 6. Contemporary deficiencies and fields for algorithm improvements

Most of the reliable multicast protocols discussed here, have been proposed before year 2005 and so are designed for relatively low data rates, that are nowadays insufficient. Current implementations of these protocols do not fit requirements of contemporary content delivery networks and cloud infrastructures. Contemporary CDNs assume distribution of massive data sets with the amount of data of units of up to Petabytes like in case of Energy Sciences Network [14]. The CDN of *Akamai*, the world largest content delivery network provider, which claims to serve about 20% of world-wide web traffic [15] by means of 100 000 of servers around the world, what again represents data sets which contemporary CDNs have to deal with. In accordance with *Akamai* technical publication of year 2010 [16], delivery of 4 GB DVD image with unicast transmission nowadays takes about 2.2 hours in regional network (800-1600 kilometers). More detailed dependency of content delivery time on distance is shown on Fig. 3. The test setup of *Akamai* hereby is transmission of 4 GB DVD image by means of unicast transmission, not multicast. A packet loss rate varies in the range of 0.6 % to 1.4 %, depending on a distance. As a comparison, the network distance between Moscow and New York is about 12 400 kilometers, and delivery of 10 GB of content over *Akamai* network takes significantly more than 30 hours.

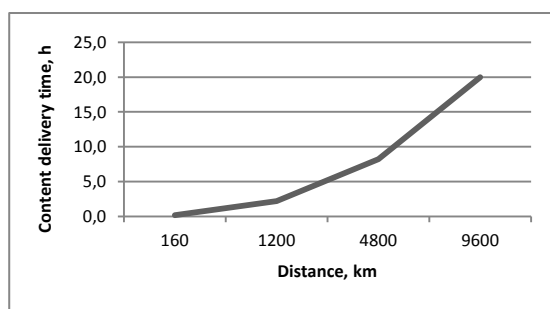


Fig. 3. Dependency of content delivery time on distance in Akamai CDN network.

Obviously, fulfilling requirements of contemporary point-to-multipoint reliable applications is still a wide field of research, and also a matter of development of new algorithms, optimization of old ones and proposing of fundamentally new reliable multicast transport protocols.

Analysis of considered reliable multicast approaches reveals some causes of performance weaknesses of each protocol. *openPGM* is potentially the fastest and the most effective solution, since it can deal with scenarios with active participation of intermediate nodes. Such scenarios assume that intermediate nodes will also deal with NACKs and be responsible for further retransmissions. It significantly reduces batch of NACKs which sender have to serve and amount of sender-retransmitted packets as well. In fact, this approach is a combination of generic approaches of both *RDCM* and *SRM*.

*UFTP* achieves relatively high data rates due to non-standard scheme of section-based data transmission. Also, it uses new schemes of retransmission, when retransmission is going to be performed not in context of certain packet, but in context of missed blocks from some certain session, size of each is calculated in accordance with each certain case.

*NORM* showcases the lowest performance among considered protocols. This can be explained by a very generic approach of the protocol. The main feature is the exploitation of FEC, but it is not really applicable well to file transmissions. Non-effective scheme of congestion control significantly reduces resulting data rate and, in fact, moves this protocol out of file transfer area.

The statements above point to the fact that some significant changes must be applied to the matter of reliable multicast data transport. We pointed out three significant fields of investigation here: congestion control, problems of time-bounded reliability and structure of sending and receiving buffer which leads to issues of software design for handling of high-speed point-to-multipoint (mostly based on multicast sessions) data transport within computing and operation systems.

Considering nowadays congestion control in reliable multicast approaches, it is easy to note imperfection of proposed algorithms. Regarding *NORM*, there is a problem of significant data rate reducing if congestion control is enabled. In fact, TCP friendly congestion control of *NORM* reduces maximal data transmission rate by the factor two. Valuable deficiency of *UFTP* protocol is manual configuration of congestion control in form of additional configuration file. It contents percentage of received NACKs in relation to number of sent packets. For each percent, it is possible to specify coefficient which resulting data transmission rate will be obtained with. Obviously that coefficient could be greater than "1" and at low percentage of NACKs, data rate could be increased. Generally speaking this is very flexible approach, but it pushes users to adjust configuration of congestion control for each environment and certain network conditions, what is very helpful in the phase of protocol development, but not usable for ready-to-use applications.

Coming back to three types of reliability, explained in section 1 and comparing with actual CDN- and cloud requirements and up-to-date trends, apparently, *time-bounded reliability* will become main trend in reliable multicast communications for next years. Jitter sensitive applications, e.g. online translations are very popular and take significant part of nowadays network approaches. *openPGM* focuses on the goal to deal a lot with *time-bounded reliability*. On this matter, it is necessary to have a very effective scheme of NACKs sending. NACKs should be sent to sender in a shortest time in order to notify sender about missed packet within retransmission window, which in turn should be as narrow as possible. Matter of retransmission windows width is another challenge in reliable multicast communications. In general, it should be adjusted in accordance with current transmission conditions in order to construct the possibly best stream of real-time traffic.

The third challenge, which has to be disclosed, is management and algorithm of sending and receiving buffer. At high data rates it will be quite valuable feature, to write and read information at the most effective and fast way. In case of multicast communications, buffer structure and mechanism of reading and writing of data have to be more complex, comparing to unicast. Dealing with NACKs buffering, described in section 1, dynamic adjustment of retransmission window will bring more and more complexity to buffer implementation.

## 7. Conclusion

The attention of internet community to reliable or even simple multicasting has been apparently reduced within last 10 years, but in this paper we have presented, that present-day networks need significant new ideas regarding content distribution and reliable real-time streaming. One of valuable and fundamental achievements for the last years in reliable multicasting is dispensing with ACKs because of strict limitations in protocols scalability. Relying on known facts and performed measurements, presented here, it is revealed that data rate limit for now is not more than 600 Mbits/s on shortcut connection, and *UFTP* shows not more than 260 Mbits/s in LAN over loss-free network links. All these numbers have been measured in local lab environments, while real-life rates showcased here are coming from *Akamai's* technical publications, according to which the actual data rate in contemporary CDN is not more than 44 Mbits/s in case of unicast. It is stable and working production environment, but not enough for fitting nowadays society needs. Set of interrelated changes and adjustments have to be done for known algorithms in order to achieve new level of real-time data transmission. Potentially, *RDCM* should provide significantly higher data rate, but it has strict requirements for links density and, other words, applicable only in closed environments of high performance data centers. Three trends of improvements are distinguished: congestion control, time-bounded reliability and sending and receiving buffer management within the senders and receivers of multicast sessions.

## REFERENCES

- [1] "IP Multicast," Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/IP\\_multicast](http://en.wikipedia.org/wiki/IP_multicast). [Accessed 5 April 2012].
- [2] "Mbone," Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/Mbone>. [Accessed 10 April 2012].
- [3] C. Coskun, "PERFORMANCE ANALYSIS OF RELIABLE MULTICAST, Master thesis," 2004. Available: <http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12605656/index.pdf>.
- [4] "RFC-5740, NACK-Oriented Reliable Multicast (NORM) Transport Protocol," Available: <http://tools.ietf.org/html/rfc5740>.
- [5] "Author Guidelines for Reliable Multicast Transport (RMT) Building Blocks," Available: <http://tools.ietf.org/html/rfc3269>.
- [6] "Internet-draft, StarBurst Multicast File Transfer Protocol (MFTP) Specification," Available: <http://tools.ietf.org/html/draft-miller-mftp-spec-02>.
- [7] "UFTP - Encrypted UDP based FTP with multicast," Available: <http://www.tcnj.edu/~bush/uftp.html>. [Accessed 10 April 2012].
- [8] "RFC-3208, PGM Reliable Transport Protocol Specification," Available: <http://tools.ietf.org/html/rfc3208>.
- [9] "MIRU development studio press release," 2010. Available: <http://openpgmdev.blogspot.de/2010/09/miru-announces-openpgm-5.html>.
- [10] M. Xu, M.-c. Zhao and C. Guo, "RDCM: Reliable data center multicast," *INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE*, pp. 56-60, 2011.
- [11] G.-I. Kwon, "INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies," in *ROMA: reliable overlay multicast with loosely coupled TCP connections*, 2004.
- [12] S. Floyd and V. Jacobson, "A reliable multicast framework for light-weight sessions and application level framing," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. Volume 5, no. Issue 6, 1997.

- [13] "RMTP: A Reliable Multicast Transport Protocol," Available: <http://www.bell-labs.com/project/rmtp/>.
- [14] "BER Network Requirements Workshop," 2010.
- [15] "Content delivery network," Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Content\\_delivery\\_network](http://en.wikipedia.org/wiki/Content_delivery_network). [Accessed 6 April 2012].
- [16] E. Nygren, R. K. Sitaraman and J. Sun, "The Akamai Network: A Platform for High-Performance Internet Applications," *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, vol. vol.44, 2010.

**Authors' information:**

**СИСТЕМА ТРЁХМЕРНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО РАДИОВИДЕНИЯ НА  
ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ АМПЛИТУДЫ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ  
(SYSTEM OF 3D WIDEBAND RADIOVISION BASED ON MEASUREMENTS OF  
WAVE FIELD MAGNITUDE)**

К.В. Завьялова, Д.Я. Суханов  
K.V. Zavyalova, D.Y. Sukhanov

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36  
E-mail: sdy@mail.tsu.ru

Предлагается метод получения трёхмерных радиоволновых изображений на основе измерений амплитуды интерференционной картины волны отраженной от объекта и прямой волны от источника. Представлены результаты экспериментальных исследований в полосе частот 8-18 ГГц по визуализации объектов на расстоянии до 1 метра. Показана возможность получения разрешения в плоскости и по дальности.

(Here is proposed the method of reconstruction of 3D radio images on the basis of magnitude measurements of interference of the wave reflected from object and direct wave from the source. There are presented results of experimental investigations for visualization of objects on the distance closer than 1 m applying frequency band 8-18GHz. There is shown the possibility of scanning plane and distance resolution.)

**Ключевые слова:**

Радиовидение, радиолокация, радиотомография, радиоголография, синтез апертуры.  
(Radiovision, radiolocation, radiotomography, radioholography, synthetic aperture.)

**ВВЕДЕНИЕ**

С давних времён, человек мечтал о всестороннем познании мира и видении его многогранности. От природы человек наделён способностью видеть мир в оптическом диапазоне спектра электромагнитных волн с длинами волн от 400 до 650 нм. Однако данной способности недостаточно для видения внутренней и трёхмерной структуры окружающих объектов реального мира. Человеку необходимо расширение своих возможностей на более широкий диапазон электромагнитного спектра, поскольку это открывает новые возможности постижения мира. В частности, совсем недавно, человечество начало осваивать диапазон СВЧ от единиц Гигагерц до единиц Тетрагерц. Наши технические возможности позволили генерировать, направлять и измерять волны этого диапазона. И теперь, человек оснащён новым средством восприятия реальности! Наша же скромная роль в этом, состоит в разработке системы трёхмерного радиовидения, которая позволит видеть трёхмерную внутреннюю структуру радиопрозрачных объектов на основе многопозиционных измерений амплитуды поля интерференции прямой волны и, отражённой от исследуемого объекта, волны, в широкой полосе частот.

Целью данной работы является разработка и исследование метода трёхмерного радиовидения на основе измерения только амплитуды поля (без измерения фазы) в плоской ограниченной области с разрешением близким к дифракционному пределу.

Однако следует отметить, что мы не первые на этом нелёгком пути – разработки систем радиовидения. Есть и другие исследователи, которые достигли успехов в данной области. Большинство существующих решений основано на технологии синтеза апертуры, использующей полную информацию о радиоволновом поле (с амплитудой и фазой). Данная технология многократно проверена и широко используется в задачах картографии, разведки, целеуказания и мониторинга окружающей среды [1-5]. В последнее время активно осваивается тетрагерцовый диапазон радиоволн [5]. Достигнуты большие успехи в подповерхностной радиолокации [2-4], где трёхмерное радиовидение развивается особенно интенсивно. В начале XXI века стала актуальна задача радиовидения в системах безопасности для предотвращения террористической угрозы.

Применение технологии синтеза апертуры в задачах радиовидения затруднено необходимостью измерения фазы волнового поля, что требует дорогостоящих комплектующих, в частности смесительных и волноводных СВЧ трактов. В то время, как измерение только амплитуды поля технически намного более простая задача. Системы трёхмерного радиовидения на основе измерения только амплитуды поля будут намного дешевле и технически проще.

### Постановка задачи

Предлагается следующая схема измерений (Рис.1). Передающая и приёмная антенны находятся друг от друга на фиксированном расстоянии  $d$  и образуют приёмо-передающий модуль. Приёмо-передающий модуль перемещается с определённым шагом в плоскости  $XOY$ , и производит измерения амплитуды поля на различных частотах. Передающая антенна подключена к перестраиваемому генератору монохроматических сигналов, и излучает радиоволны в сторону исследуемого объекта и в сторону приёмной антенны. Волна, отражённая от объекта (предметная волна), интерферирует с прямой волной от источника (опорной волной). К приёмной антенне подключен детекторный диод, с помощью которого, через аналого-цифровой преобразователь (АЦП), измеряется интенсивность (квадрат амплитуды) волны.

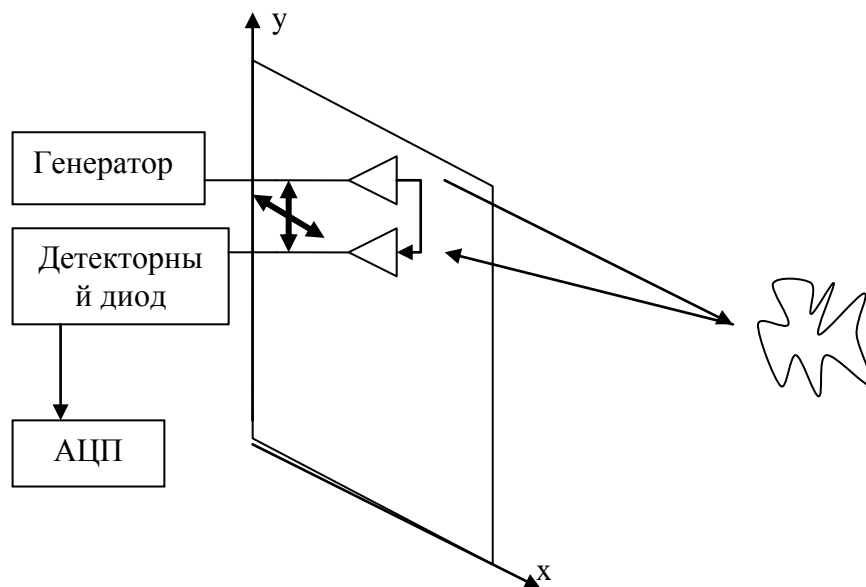


Рис. 1. Схема измерений

Рассматривается задача локационного сверхширокополосного видения объёмных изображений объектов с использованием монохроматических несинхронизированных передатчика и приёмника. Необходимо восстановить распределение неоднородностей в среде по результатам локационных широкополосных радиоизмерений. Зондирование производится монохроматическим сигналом со сканированием по частоте в широкой полосе.

Измерения производятся при излучении монохроматического сигнала на определённой частоте, затем частота перестраивается, и измерения повторяются в каждой точке области сканирования. Подобные измерения производятся на нескольких частотах в широкой полосе, таким образом, реализуются широкополосные радиоголографические измерения.

### Решение прямой задачи распространения радиоволн в промежутке между исследуемым объектом и областью сканирования

Для описанной схемы измерений предлагается математическая модель, которая позволяет определить результат измерений по заданному распределению неоднородностей в

среде, то есть решение прямой задачи. Рассматривается скалярное приближение однократного рассеяния [6]. Исследуемый объект представим как множество изотропных, точечных рассеивателей, которое описывается трёхмерной скалярной функцией  $\rho(x, y, z)$ .

Поле в приёмной антенне на частоте  $f$  можно записать следующим образом:

$$U(x, y, f) = A \iiint_V \rho(x', y', z') \frac{\exp(ik(r_1 + r_2))}{(4\pi)^2 r_1 r_2} dx' dy' dz' + \hat{B} \frac{\exp(ikd)}{4\pi d} =$$

$$= A \cdot S_1(x, y, f) + B \cdot S_0(f), \quad (1)$$

где первое слагаемое описывает предметную волну  $S_1(x, y, f)$ , а второе слагаемое – опорную  $S_0(f)$ , причём  $|S_0(f)| = 1$ ; нормирующие коэффициенты  $A$  и  $B = \frac{\hat{B}}{4\pi d}$  описывают соотношение амплитуд предметной и опорной волн;  $r_1 = \sqrt{(x' - x_0)^2 + (y' - y_0)^2 + z'^2}$  – расстояние от передающей антенны до точки в объёме интегрирования,  $(x_0, y_0, 0)$  – координата источника,  $r_2 = \sqrt{(x' - (x_0 + d))^2 + (y' - y_0)^2 + z'^2}$  – расстояние от приёмной антенны до точки в объёме интегрирования,  $(x_0 + d, y_0, 0)$  – координата приёмной антенны.

Сигнал из приёмной антенны поступает в детектор, сигнал с которого оцифровывается в АЦП. Будем считать, что напряжения на входе АЦП пропорциональны интенсивности поля в приёмной антенне  $W = |U|^2$ . Тогда возможно выделить косинус квадратуры предметного сигнала, в приближении, что амплитуда опорного сигнала много больше предметного. Для этого достаточно вычесть из  $W$  среднее значение по всем измерениям на одной частоте (которое приблизительно равно интенсивности опорного сигнала) и умножить на фазу опорного сигнала, в результате получим величину  $\tilde{S}_1$ .

Величина  $\tilde{S}_1$  является комплексной величиной, и имеет фазу близкую к фазе  $S_1$ , с точностью до  $\pm \frac{\pi}{2}$ . Так же  $\tilde{S}_1$  имеет амплитуду, которая не больше чем  $A \cdot |S_1|$ .

### Восстановление рассеивающих объектов в трёхмерном объёме с помощью метода согласованной фильтрации

Изображение рассеивающих объектов восстанавливается путём пространственно-согласованной фильтрации (фокусировки) функции  $\tilde{S}_1(x, y, f)$ . Пространственно-согласованный фильтр имеет вид:

$$H(x, y, z, f) = \frac{\exp(-ik(r_1 + r_2))}{(4\pi)^2 r_1 r_2}, \quad (2)$$

где  $r_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ ,  $r_2 = \sqrt{(x - d)^2 + y^2 + z^2}$ .

Трёхмерное изображение восстанавливается следующим образом:

$$\tilde{\rho}(x, y, z) = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \iint_S \tilde{S}_1(x', y', f) H(x - x', y - y', z, f) dx' dy' df \quad (3)$$

Выражение (3) позволяет получить трёхмерное изображение, которое пропорционально коэффициенту рассеяния объектов в исследуемом пространстве  $\rho(x, y, z)$ . Однако использование выражения (3) на практике затруднено, поскольку оно требует значительных



вычислительных ресурсов. Решение данной проблемы возможно с использованием быстродействующего алгоритма на основе быстрого преобразования Фурье [7-8].

Разрешение в плоскости сканирования определяется классическими соотношениями для радара с синтезированной апертурой:  $\Delta x = \frac{\lambda}{B} z$ , где  $\lambda$  – центральная длина волны,  $B$  – размеры области сканирования,  $z$  – расстояние от области сканирования до исследуемого объекта.

Разрешение по дальности:  $\Delta z = \frac{c}{f_2 - f_1}$ , где  $f_2, f_1$  – максимальная и минимальная частоты в рассматриваемой полосе частот,  $c$  – скорость света.

### Результаты численного моделирования голографического метода радиовидения трёхмерных изображений объектов

Предложенный метод был смоделирован численно для диапазона частот от 5 ГГц до 10 ГГц на области пространства 1x1x1 м<sup>3</sup>. В численной модели источник и приёмник разнесены на расстояние 10 см, и перемещаются вместе на области 1x1 м<sup>2</sup>, с шагом 4 мм. Исследуемая неоднородность представляла собой плоский объект, ступенчатой формы, с размером ступеньки 5 см (Рис. 2), который был расположен на расстоянии 30 см от области сканирования.

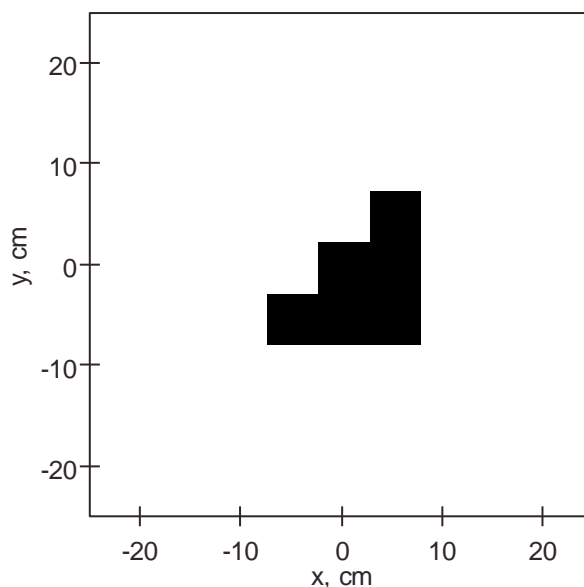


Рис. 2. Изображение исследуемого объекта

Для представленного объекта было произведено численное моделирование результата измерений предложенной радиоголографической системой (Рис. 1). На результате можно видеть характерную голографическую интерференционную картину.

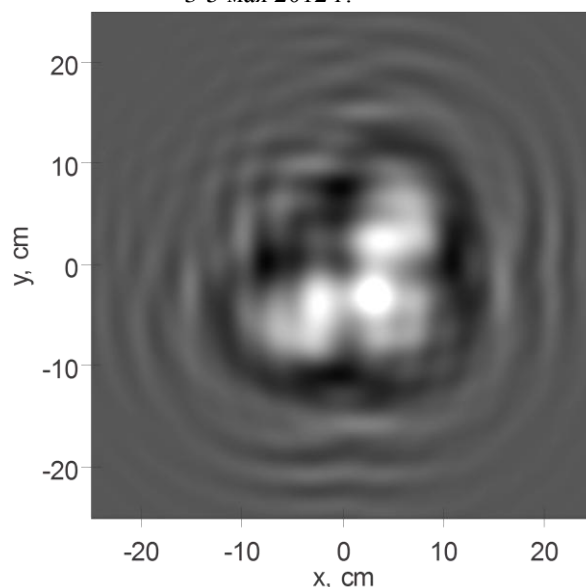


Рис. 3. Численно смоделированный результат измерений на входе АЦП

Используя результат решения прямой задачи (Рис. 3) было произведено восстановление трёхмерного изображения исследуемого объекта. На рис. 4 представлено сечение восстановленного трёхмерного изображения плоскостью параллельной  $XOY$  на дальности  $z = 30$  см.

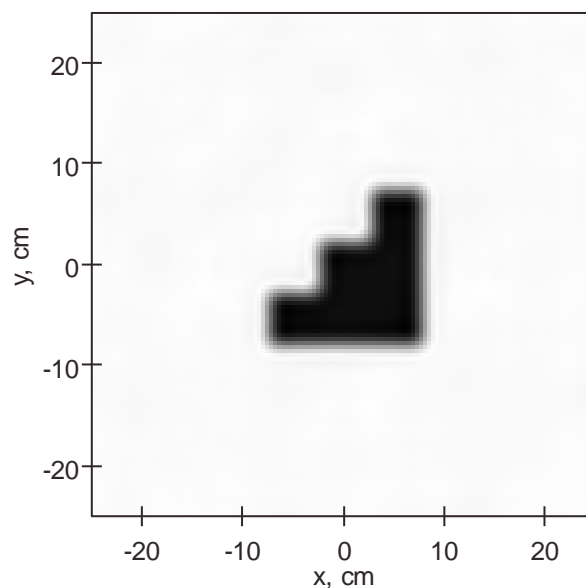


Рис. 4. Результат восстановления изображения исследуемого объекта  
в плоскости  $XOY$

На рис. 5 представлен вид восстановленного изображения по оси  $z$  при  $x = 0, y = 0$ . Из представленных рисунков можно видеть, что достигнуто разрешение близкое к дифракционному пределу для систем с синтезированием апертуры. В данном случае разрешение в плоскости сканирования около 15 мм. Достигнутое разрешение по дальности составляет около 6 см, которое определяется шириной используемой полосы частот. Для используемой полосы в 5 ГГц теоретический предел разрешающей способности по дальности составляет 6 см.

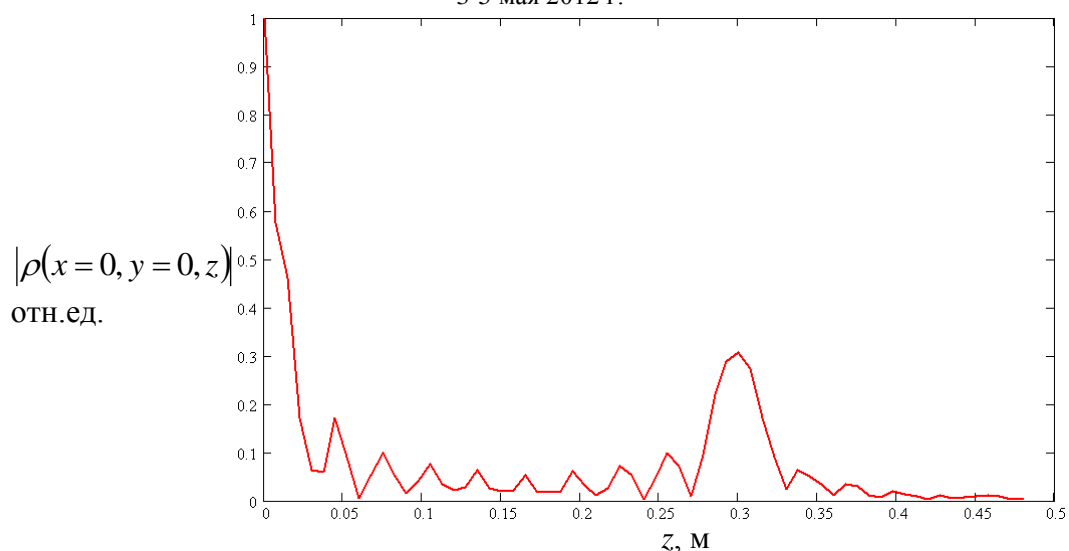


Рис. 5. Вид восстановленного трехмерного изображения по оси  $z$  для демонстрации разрешения по дальности

Таким образом, численное моделирование показывает принципиальную возможность получения трёхмерных радиоизображений путем измерения только амплитуды поля на различных частотах при сканировании в широкой полосе частот. Трёхмерное изображение, полученное предложенным способом, имеет сравнимое качество с изображениями, получаемыми методами на основе технологии синтеза апертуры с измерением фазы. Процедура восстановления трёхмерного изображения сводится к трехмерному быстрому преобразованию Фурье.

#### **Экспериментальные исследования радиолографической схемы с приёмо-передающим модулем со сканированием в широкой полосе частот**

В соответствии со схемой представленной на рис. 1 были проведены экспериментальные исследования. В эксперименте использовался диапазон частот от 8 ГГц до 18 ГГц, на 512 частотах с равномерным шагом. Измерения проводились для металлического объекта ступенчатой формы (Рис. 6), с размером ступеньки 5 см, на удалении 40 см от области перемещения приёмо-передающего модуля (области сканирования).

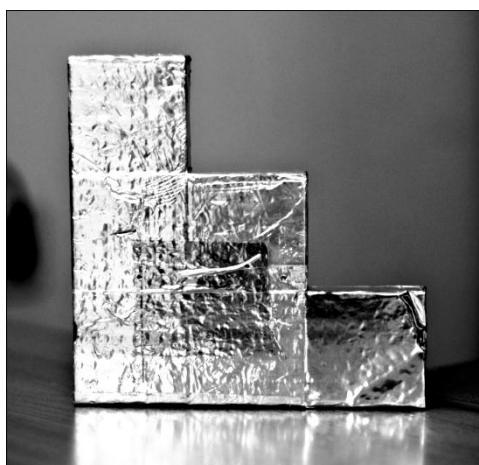


Рис. 6. Фотография исследуемого объекта сложной ступенчатой формы

Сканирование производилось двухкоординатным сканером на области 80 см на 80 см, с шагом 1 см (Рис. 7). Двухкоординатный механический сканер представляет собой квадратную раму размерами 110 см на 110 см, с двумя взаимоперпендикулярными направляющими передвигаемыми стальными тросами. Движение тросов осуществляется с помощью двух шаговых двигателей. Каждый двигатель управляет одной из двух направляющих. На

пересечении направляющих находится крестовина, на которой крепится приёмо-передающий модуль. Приёмо-передающий модуль представляет собой две антенны типа «Улитка» разработки Буянова Юрия Иннокентиевича, с широкой диаграммой направленности. Одна антенна используется для излучения сигнала, а вторая для – приёма сигнала. Антенны разделены медной пластиной для ослабления прямого сигнала от излучателя к приёмнику. Однако прямой сигнал остаётся достаточно сильным, чтобы его можно было использовать в качестве опорного сигнала.

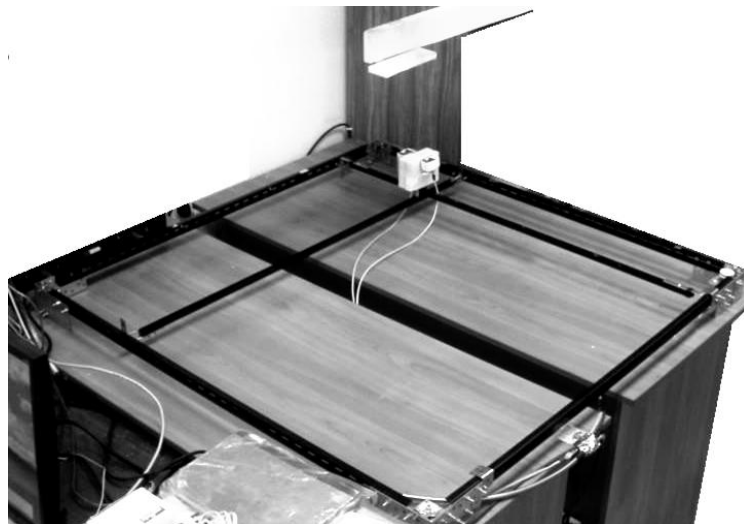


Рис. 7. Фотография экспериментальной установки

Результат измерений амплитуды поля на частоте 10 ГГц представлен на рис. 8. На других частотах были получены аналогичные изображения. Можно наблюдать некоторую интерференционную картину, которая должна содержать информацию об исследуемом объекте.

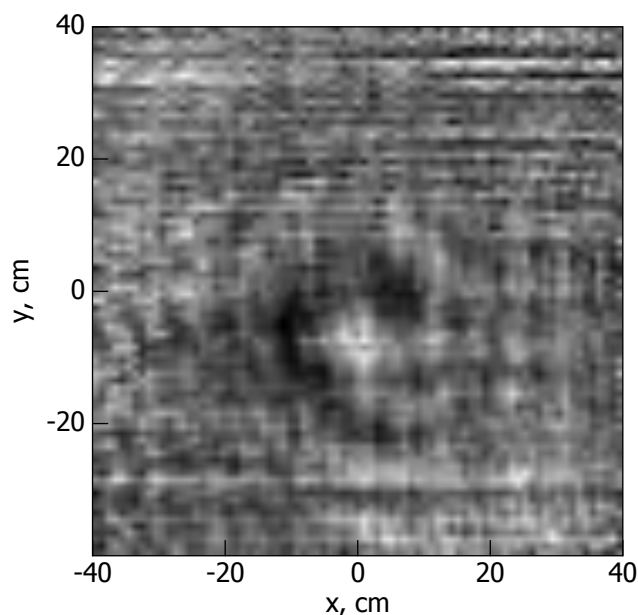


Рис. 8. Негативное изображение измеренной амплитуды поля на частоте 10 ГГц

Полученные экспериментальные данные были обработаны с помощью предложенного метода быстродействующего алгоритма трехмерной фокусировки. В результате было получено изображение тестового объекта (Рис. 9). На изображении также, кроме объекта, видна поддерживающая конструкция.

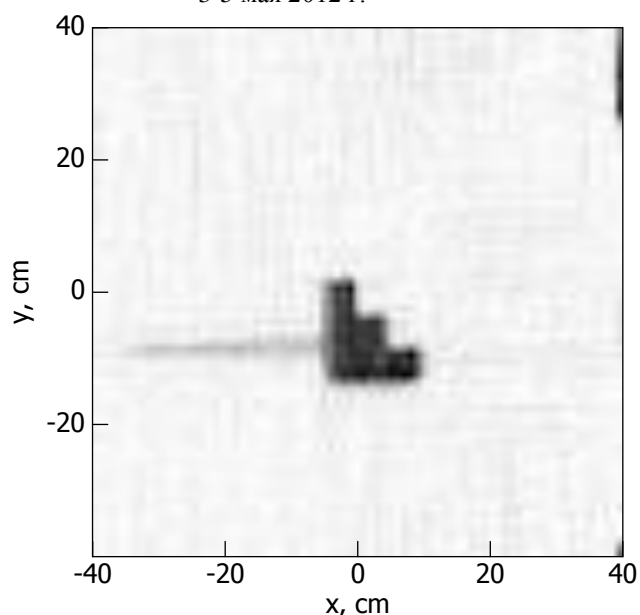


Рис. 9. Результат восстановления изображения тестового объекта

Можно видеть, что получено разрешение в плоскости порядка 10-15 мм, что близко к дифракционному пределу для использованного диапазона частот. Эксперимент показал, что предложенный радиолографический метод получения трёхмерных изображений применим на практике. Также можно видеть соответствие экспериментальных результатов и результатов численного моделирования, что подтверждает достоверность полученных результатов и работоспособность предложенной радиолографической схемы измерений. Пространственное разрешение предложенного метода в плоскости параллельной плоскости сканирования определяется размерами апертуры (области сканирования). Разрешение по дальности определяется шириной полосы используемых частот.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов/ Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: «Радиотехника», 2005. – 368 с.
2. Вопросы подповерхностной радиолокации. Коллективная монография. Сер. «Радиолокация» / Под ред. А.Ю. Гринёва. – М.: Радиотехника, 2005. – 416 с.
3. Nguyen L., Dogaru T., Innocenti R. 3-D SAR Image Formation for Underground Targets Using Ultra-Wideband (UWB) Radar // Radar Sensor Technology XIII; Proc. of SPIE. – 2009. – V. 7308. – № 73081F.
4. Fortuny-Guasch Joaquim. A Novel 3-D Subsurface Radar Imaging Technique // IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing. – 2002. – V. 40. – № 2. – P. 443–452.
5. Bepalov V.G., Gorodetsky A.A. THz Holography With Reference Beam // Practical Holography XXIII: Materials and Applications; Proc. of SPIE. – V. 7233. – № 72330G–1.
6. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. -М.: Наука, -1990.
7. Суханов Д.Я., Завьялова К.В. Восстановление трёхмерных радиоизображений по результатам многочастотных голографических измерений // Журнал технической физики, - 2012. - Т. 82. - Вып. 6. - С. 85-89.
8. Суханов Д.Я., К.В. Завьялова. Трёхмерное широкополосное радиовидение на основе измерения амплитудного распределения интерференционной картины за дифракционной решёткой // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2010. – Вып. 9 (2). – С. 98–102.

**Сведения об авторах:**

УДК

**НАСТРОЙКА БАЛАНСИРОВОЧНОГО СТЕНДА: К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ  
ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АСИММЕТРИИ МАСС ТЕЛА  
(ПЕРЕВОД НАЗВАНИЯ НА АНГЛИЙСКИЙ ЯЗЫК)**

А.В. Ключников

**ФИО автора на английском языке**  
РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина,  
E-mail: kb2@vniitf.ru

Рассмотрен способ экспериментальной настройки динамического балансировочного стенда для прецизионного определения параметров массо-инерционной асимметрии тонкостенного роторного модуля конической формы.

**(Аннотация на английском языке)**

**Ключевые слова:**

Балансировка, стенд, центр масс, массо-инерционная асимметрия.

**(Ключевые слова на английском языке)**

С развитием техники возрастают требования к точности экспериментального определения параметров массо-инерционной асимметрии сложных тел вращения, в частности, роторов, в состав которых входят отсеки, рамы, аппаратура, после их изготовления и сборки, а также к точности обеспечения требуемых в КД на изделие нормативов статической и моментной балансировки. Например, к таким изделиям относятся тонкостенные роторные модули силовых установок транспортных средств (воздушных, морских, наземных, космических), обладающие конической (или близкой к конической) формой. К параметрам массо-инерционной асимметрии относятся поперечный эксцентриситет центра масс относительно геометрической оси (в качестве которой обычно принимают ось симметрии наружной поверхности) модуля и угол отклонения продольной главной центральной оси симметрии (ГЦОИ) от той же оси [1].

Для прецизионного уравнивания тонкостенных конических роторных модулей, обладающих единственной действительной плоскостью коррекции, располагающейся на торце или вблизи торца конуса, на низких (1–3 Гц) рабочих частотах вращения, создана автоматизированная система контроля (АСК) на базе персонального компьютера и динамического дорезонансного низкочастотного балансировочного стенда с жесткими опорами, выполненными в виде газостатических подшипников, и вертикальным расположением оси вращения. Пьезоэлектрические датчики силы, измеряющие вибрации опор, установлены в упругих элементах опор. Частота вращения ротора измеряется с помощью оптоволоконного датчика оборотов, срабатывающего при появлении контрастной метки, закреплённой на боковой поверхности ротора, по завершении каждого полного оборота. Датчик оборотов также используется в качестве отметчика фазы дисбалансов [2].

Из литературы [3–5] и других источников известно, что при балансировке динамически неуравновешенный жесткий ротор принято рассматривать как полностью сбалансированный ротор, в двух плоскостях коррекции которого прикреплены точечные неуравновешенные массы. При вращении такого ротора с постоянной угловой скоростью  $\omega$  вокруг неподвижной оси возникают переменные нагрузки на опорах, пропорциональные дисбалансам в плоскостях коррекции. Это позволяет свести процесс балансировки к измерению нагрузок или вибраций опор с последующим определением значений и углов двух векторов дисбалансов, действующих соответственно в каждой из двух плоскостей коррекции и полностью определяющих динамическую неуравновешенность ротора. Затем по законам статики рассчитывают параметры главного вектора и главного момента дисбалансов ротора, из которых определяют значения параметров массо-инерционной асимметрии относительно его геометрической оси. После чего (при необходимости) рассчитывают массу и угол установки балансировочного груза, прикрепление которого на штатную плоскость коррекции ротора обеспечит приведение значений параметров его массо-инерционной асимметрии к заданным в

эксплуатационной документации на ротор нормативам, и проводят корректировку массы ротора.

Для определения дисбалансов выполняют серию из нескольких пусков тела, находящегося как в исходном состоянии, так после прикрепления пробных грузов известной массы к плоскостям коррекции в известных угловых положениях, с регистрацией реализаций вибросигналов и постобработкой всего блока экспериментальных данных.

Способ балансировки тела, обладающего единственной физически реализованной плоскостью коррекции, требует использования дополнительного оборудования в процессе тарирования стенда (т.е. настройки стенда на контролируемое тело).

Для проведения на АСК балансировочного эксперимента в соответствии с рисунком 1 контролируемое тело 1 жёстко носком вниз устанавливается своими базовыми поверхностями 2, обладающими конической формой, на внутренние опоры 3 загруженного на стенд специального защитного технологического переходника 4, выполненного в виде полого усечённого конуса, наружные боковые поверхности которого соответствуют рабочим поверхностям газостатических подшипников 5. Тело балансируется как отдельная деталь сборного ротора [2, 6]. Переходник обеспечивает материализацию второй плоскости коррекции. При этом измерения дисбалансов тела в исходном состоянии выполняют дважды, для двух взаимно противоположных относительно технологического переходника угловых положений, что обеспечивает исключение влияния дисбалансов переходника на результаты измерений [6]. В качестве балансировочной (верхней) плоскости коррекции 6, используется (для установки как пробных, так и балансировочных грузов) штатная плоскость коррекции контролируемого тела, образованная резьбовыми отверстиями, равномерно расположенными по окружности. В качестве второй (нижней) плоскости коррекции 7 (так называемой виртуальной, т.е. предназначенной только для установки пробных грузов в процессе настройки стенда и для проведения балансировочных расчётов) используется нижний торец технологического переходника, имеющий равномерно расположенные по окружности резьбовые отверстия.

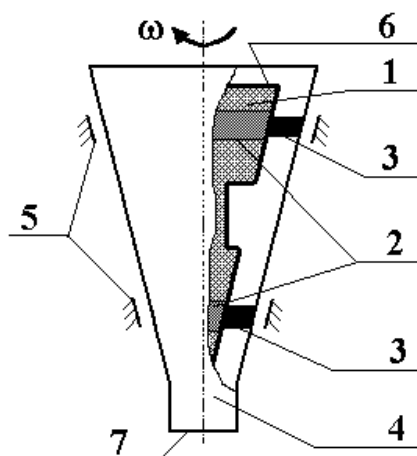


Рис.1. Схема сборного ротора

На практике дисбалансы, измеряемые в каждой из плоскостей коррекции сборного ротора, представляют собой сумму двух дисбалансов, действие одного из которых обусловлено наличием неуравновешенной массы в контролируемой плоскости коррекции, а другого – наличием неуравновешенной массы в противоположной плоскости коррекции, т.е. является результатом так называемого взаимного влияния указанных плоскостей. Применение методов цифровой регистрации и обработки сигналов дисбалансов требует экспериментального определения и использования величины взаимного влияния плоскостей коррекции при проведении последующего балансировочного расчёта.

На рисунке 2 показано распределение динамических давлений (без учёта угловой скорости вращения) от неуравновешенности, обусловленной наличием неуравновешенной массы  $m_B$ , установленной на радиусе  $r_B$  в верхней плоскости коррекции, по неподвижным опорам, произведённое на основании законов статики. Наличие неуравновешенной массы в верхней плоскости коррекции вызывает реакцию не только ближайшей (вектор  $\vec{C}$ ), но и

противоположной (вектор  $\vec{D}$ ) опоры, что при проведении измерений дисбалансов проявляется через механизм взаимного влияния плоскостей коррекции и снижает точность измерений и, следовательно, точность последующих балансировочных расчётов.

Теоретически настройка дорезонансного балансировочного стенда может быть выполнена по геометрическим параметрам – по расстоянию между плоскостями коррекции  $L$  и расстояниям  $a$  и  $b$  этих плоскостей от опор. При использовании аналоговой измерительной системы стенда исключение взаимовлияния плоскостей коррекции выполняется путём регулировки потенциометров [3, 5].

Однако, принимая во внимание геометрию и значительные габаритные размеры газостатических подшипников, а также неидеальность их изготовления, возможную неравномерность воздушной плёнки между сопрягаемыми поверхностями технологического переходника и газостатических подшипников, разброс масс и продольных координат центра масс для конкретных роторов, непостоянство условий проведения различных балансировочных экспериментов (в частности, по температуре и влажности окружающего воздуха и сжатого воздуха, поступающего из заводской пневмосети), и ряд других аспектов, определение точек приложения реакций опор с точностью, требуемой для практического применения, является сложной технической задачей и не позволяет проводить настройку стенда по его геометрическим параметрам. Для обеспечения высокой точности балансировки требуется экспериментальная настройка балансировочного стенда на каждое конкретное изделие перед его уравниванием. Знание закона взаимного влияния плоскостей коррекции и учёт этого взаимовлияния необходимы при определении дисбалансов, действующих в плоскостях коррекции, и последующем расчёте параметров массо-инерционной асимметрии тела, а также (при необходимости) массы и углового положения балансировочного груза. Очевидно, поскольку уравнивание тела выполняется по результатам измерений дисбалансов в двух плоскостях коррекции, то необходима настройка стенда по обеим этим плоскостям.

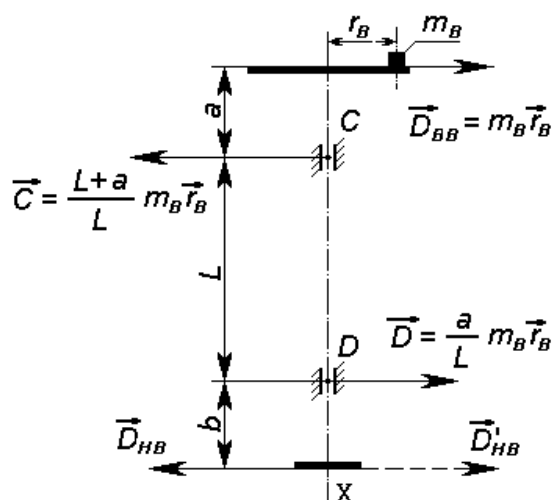


Рис. 2. Распределение динамических нагрузок по опорам (груз в верхней плоскости коррекции)

Настройку стенда проводят с помощью пробных грузов известной массы, выполненных в виде резьбовых втулок, последовательно прикрепляемых к верхней и нижней плоскостям коррекции на известных радиусах и с известным угловым положением относительно системы координат контролируемого ротора [6]. В процессе настройки определяют коэффициенты балансировочной чувствительности измерительной системы стенда к значениям и углам дисбалансов, действующих в каждой из плоскостей коррекции, а также коэффициенты взаимовлияния плоскостей коррекции. Расчёт коэффициента взаимовлияния плоскостей коррекции при установке пробного груза в верхней плоскости коррекции выполняют по формуле

$$K_{HB} = \frac{D_{HB}}{D_{BB}}, \quad (1)$$



где  $D_{HB}$  и  $D_{BB}$  – значения дисбалансов, действие которых соответственно в верхней и нижней плоскостях коррекции обусловлено установкой пробного груза  $m_B$ , на радиусе  $r_B$  в верхней плоскости коррекции.

При проведении расчётов направление используемого вектора  $\vec{D}_{HB}$  (или противоположного ему по направлению и равного по значению вектора  $\vec{D}'_{HB}$  на рисунке 2) принимается в качестве положительного, не изменяется на протяжении всего балансировочного эксперимента и учитывается при выполнении операций вычитания (суммирования) векторов дисбалансов при проведении балансировочного расчёта.

Аналогично может быть приведено распределение динамических давлений по опорам от неуравновешенности, обусловленной наличием груза  $m_H$ , установленного на радиусе  $r_H$  в нижней плоскости коррекции. Тогда расчёт коэффициента взаимовлияния плоскостей коррекции при установке пробного груза в нижней плоскости коррекции выполняются по формуле

$$K_{BH} = \frac{D_{BH}}{D_{HH}}, \quad (2)$$

где  $D_{BH}$  и  $D_{HH}$  – значения дисбалансов, действие которых соответственно в верхней и нижней плоскостях коррекции обусловлено установкой пробного груза  $m_H$ , на радиусе  $r_H$  в нижней плоскости коррекции.

Экспериментальная проверка способа балансировки тела вращения на вертикальном динамическом балансировочном стенде с коническими газостатическими подшипниками [7] с использованием алгоритма балансировочного расчёта, исключая взаимовлияние плоскостей коррекции на результаты измерений (путем внесения соответствующих поправок) подтвердила высокую эффективность и точность способа. С использованием эталонного ротора [8] способ обеспечивает определение относительно геометрической оси контролируемого тела величины поперечного смещения центра масс и угла отклонения продольной ГЦОИ тела массой более 90 кг (в процессе его балансировки в качестве отдельной детали сборного ротора) с погрешностями, не превышающими соответственно 0,01 мм и 1 угловой минуты [9].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярошевский В.А. Движение неуправляемого тела в атмосфере – М.: Машиностроение, 1978. – 168 с.
2. Глазырина Л.М., Ключников А.В., Мальгин А.И., Фомин Ю.П. Разработка интеллектуального измерителя МЦИХ роторов // Труды международной научно-технической конференции «Проблемы автоматизации и управления в технических системах» – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. – С. 46–49.
3. Основы балансировочной техники. Т.1. Уравновешивание жестких роторов и механизмов / Под ред. проф. В.А. Щепетильникова. – М.: Машиностроение, 1975. – 527 с.
4. ГОСТ 22061-76. Машины и технологическое оборудование. Система классов точности балансировки. – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 139 с.
5. Теория и конструкция балансировочных машин / Под ред. проф. В.А. Щепетильникова. – М.: Машиностроение, 1963. – 444 с.
6. Патент РФ на изобретение №2292534. Способ балансировки ротора / Л.М. Глазырина, М.С. Карповицкий, А.В. Ключников, А.И. Мальгин, Г.Г. Смирнов, Ю.П. Фомин // Бюллетень изобретений №3, 2007. Приоритет от 27.04.2004.
7. Патент РФ на изобретение №2292533. балансировочный стенд с вертикальной осью вращения / Л.М. Глазырина, М.С. Карповицкий, А.В. Ключников, А.И. Мальгин, Г.Г. Смирнов, Ю.П. Фомин // Бюллетень изобретений №3, 2007. Приоритет от 27.04.2004.
8. Патент РФ на изобретение №2434212. Способ проверки качества функционирования низкочастотного динамического балансировочного стенда / А.В. Ключников, Ю.П. Фомин // Бюллетень изобретений №32, 2011. Приоритет от 24.02.2010.
9. Ключников А.В., Сидоров А.В. Применение метода динамической балансировки для прецизионного контроля параметров массо-инерционной асимметрии роторных объектов // Приборы и системы. Управление, Контроль, Диагностика. – 2011. – №3. – С. 48–53.

**Сведения об авторах:**

**Ключников А.В.:** к.т.н., начальник отдела 827, Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академ. Е.И.Забабина, г.Снежинск., сфера научных интересов: приборы измерения в военной технике.

**ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ И МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СРЕДСТВ  
РАЗРАБОТКИ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОГО ИНТЕРФЕЙСА ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ  
КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ  
(PROGRAM-TECHNICAL MEANS AND METHODOLOGICAL SUPPORT FOR THE  
DEVELOPMENT OF HUMAN-MACHINE INTERFACE FOR SMALL CONTROL AND  
MEASUREMENT DEVICES)**

С.А. Кожевников, А.Г. Якунин  
S. Kozhevnikov, A. Yakunin

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова  
г. Барнаул  
E-mail: Lezard-87@mail.ru

Статья посвящена совершенствованию человеко-машинных интерфейсов. Предлагается методика оптимизации алгоритмов выполнения управляющих операций в малогабаритных устройствах информационно-измерительных и управляющих систем на примере модулей для задания уставок. (The article is devoted to improving human-machine interfaces. The methodology of optimization of perform management operations of algorithms for the job setting in small units of measurement and control systems is proposed.)

**Ключевые слова:**

Человеко-машинный интерфейс, информационно-измерительные и управляющие системы, малогабаритные устройства.  
(Human-machine interface, information-measuring and control systems, small-sized devices.)

Важными требованиями, предъявляемыми к человеко-машинному интерфейсу микроконтроллерных устройств, информационно-измерительных и управляющих систем (например, различных мобильных и выносных модулей), являются минимизация времени выполнения управляющих воздействий (например, операции задания уставок, параметров регулирования и т.д.) при одновременной минимизации затрат на техническую реализацию интерфейса. При этом для одних систем наибольшее значение имеет минимизация времени выполнения таких воздействий, а для других – минимизация количества управляющих элементов системы и/или их стоимости [1].

**Цель настоящей работы** – разработать методику, позволяющую оптимизировать алгоритм выполнения определенных управляющих операций (например, задания уставок) в микроконтроллерных устройствах, информационно-измерительных и управляющих системах.

Суть предлагаемой методики заключается в том, что изучаемый функциональный блок (подсистема) заменяется адекватной имитационной моделью (логико-математическое описание), описывающей реальную систему, и с ней проводятся эксперименты на компьютере с целью получения информации об этой подсистеме, анализа и оценки функционирования подсистемы.

Проведение экспериментов над реальной подсистемой нецелесообразно из-за длительности проведения эксперимента в реальном масштабе времени, и нереальности привлечения достаточного для получения репрезентативной выборки количества людей.

Имитационное моделирование позволяет построить модель процесса выполнения определенных управляющих операций (например, задания уставок) с учетом психофизиологических особенностей оператора (времени реакции, вероятности ошибок оператора при выполнении управляющих воздействий и т.д.). Полученную модель можно «проиграть» во времени с разными значениями входных данных, получить статистику происходящих процессов, и, тем самым, выбрать наиболее оптимальный алгоритм выполнения управляющих операций.

Положим, что задача задания уставок заключается в выставлении на n-разрядном цифровом дисплее некоторого заданного числа с помощью ограниченного набора управляющих органов (ручек, кнопок, джойстиков и пр.).

При использовании алгоритмов, заключающихся в осуществлении последовательного выбора разрядов цифрового дисплея (выбранный разряд выделяется курсором) и изменении значения выбранного разряда, возможны следующие виды ошибок:

- 1) При перемещении курсора случайно пропущен нужный разряд.
- 2) При изменении значения в разряде случайно пропущено нужное значение.
- 3) Ошибочный выбор действия перемещения курсора (перемещение курсора в противоположном направлении или перемещение курсора вместо изменения значения разряда).
- 4) Ошибочный выбор действия изменения значения разряда (изменение значения в противоположном направлении или изменение значения разряда вместо перемещения курсора).

Для описания в модели действий оператора было предложено ограничиться следующими параметрами:

1) Время выбора действия – время, которое необходимо оператору на обдумывание следующего действия. Прежде чем начать нажимать какую-нибудь кнопку, оператор должен понять, какую кнопку ему необходимо нажать следующей, и на какое время.

2) Время, которое тратится на одно кратковременное нажатие кнопки.

3) Время задержки после установки значения в разряде - время лишнего удержания кнопки, когда нужное значение разряда установлено (время реакции). После того, как значение в разряде будет установлено, проходит интервал времени, пока оператор отреагирует и отпустит кнопку. Величина этого интервала зависит от скорости реакции оператора.

4) Вероятность P1 ошибки при выборе позиции курсора (ошибки первого вида, когда оператор пропускает нужную позицию курсора).

5) Вероятность P2 ошибки при задании значения разряда (ошибки второго вида, когда оператор отпускает кнопку либо до, либо после нужного значения разряда в выбранной позиции).

6) Вероятность P3 ошибочного действия при необходимости перемещении курсора (ошибки третьего вида, когда оператор выбирает неверное направление перемещения курсора, либо вместо перемещения курсора начинает изменять значение в текущем разряде).

7) Вероятность P4 ошибочного действия при необходимости изменения значения в текущем разряде (ошибки четвертого вида, когда оператор вместо изменения значения разряда начинает перемещать курсор, либо же начинает увеличивать значение разряда вместо его уменьшения, либо, наоборот, уменьшать значение вместо увеличения).

Для реализации методики было разработано специализированное ПО для моделирования процесса задания уставок, состоящее из трех типов программ:

1) Мониторинговые программы-симуляторы. В таких программах реализуется некоторый алгоритм задания уставок и, соответственно, набор программно-технических средств, необходимый для реализации данного алгоритма. В каждую из этих программ включена подсистема, работающая по принципу KeyLogger и создающая логи, фиксирующие временную последовательность всех выполняемых оператором управляющих действий, направленных на достижение поставленной цели.

2) Анализатор логов, который позволяет анализировать логи, сделанные программами-симуляторами. Экранная форма программы для анализа логов представлена на рисунке 1. Суть анализа логов состоит в определении интервала значений параметров, характеризующих свойства операторов, путем вычисления их среднего значения и стандартного отклонения, а также для нахождения вероятностей ошибок всех четырех видов.

3) Программа моделирования алгоритмов, которая позволяет моделировать процесс задания уставок по различным алгоритмам с различными значениями параметров. При моделировании используются данные, полученные анализатором логов. В качестве значений параметров, характеризующих свойства оператора, при моделировании используется случайная величина из интервала значений соответствующего параметра. Экранная форма программы представлена на рисунке 2.

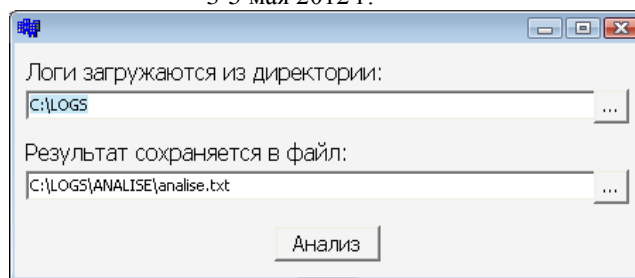


Рис.1. Экранная форма программы для анализа логов

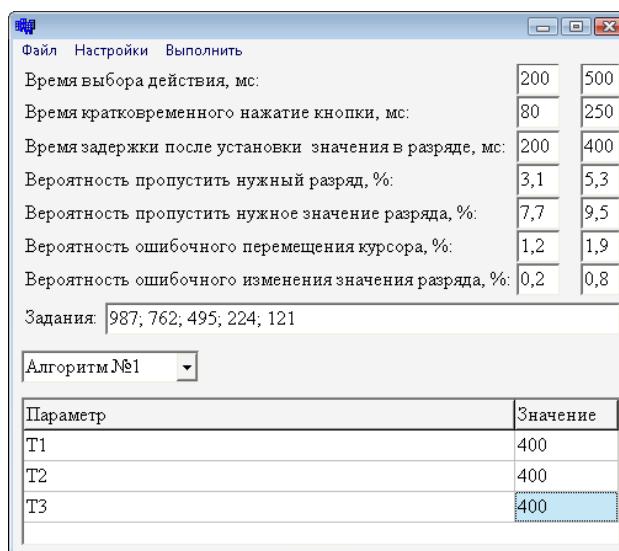


Рис.2. Экранная форма программы моделирования процесса задания уставок

Для исследования были выбраны следующие наиболее распространенные способы задания уставок, отличающихся числом кнопок и используемым алгоритмом.

1) Способ задания уставок, заключающийся в осуществлении последовательного выбора разрядов цифрового дисплея и изменении значения выбранного разряда. Для индикации выбранного для изменения разряда цифрового дисплея выбранный разряд выделяют курсором (мигающая цифра). Экранная форма реализующего данный способ программы-симулятора представлена на рисунке 3. Две кнопки предназначены для выбора разряда цифрового дисплея (сдвиг курсора соответственно на один разряд влево и вправо); две другие кнопки предназначены соответственно для увеличения и уменьшения значения выбранного разряда цифрового дисплея на единицу.



Рис.3. Форма программы-симулятора процесса задания уставок по алгоритму №1

2) Экранная форма программы-симулятора для второго способа задания уставок представлена на рисунке 4. Здесь две кнопки предназначены для выбора разряда цифрового дисплея (сдвиг курсора соответственно на один разряд влево и вправо); третья кнопка предназначена для увеличения значения выбранного разряда цифрового дисплея на единицу.



Рис.4. Форма программы-симулятора процесса задания уставок по алгоритму №2

3) Экранная форма программы-симулятора, реализующей третий способ задания уставок, представлена на рисунке 5. Первая кнопка предназначена для выбора разряда цифрового дисплея путем перемещения курсора, а вторая - для увеличения значения выбранного разряда цифрового дисплея. Каждым нажатием первой кнопки курсор перемещают на один разряд влево относительно выбранного разряда – в сторону старших разрядов, с дальнейшим переходом после последнего разряда на младший разряд. После перемещения курсора на нужный разряд цифрового дисплея устанавливают требуемое значение данного разряда нажатием второй кнопки. При каждом нажатии данной кнопки значение выбранного разряда увеличивают на единицу в цикле от 0 до 9 и далее по кругу.

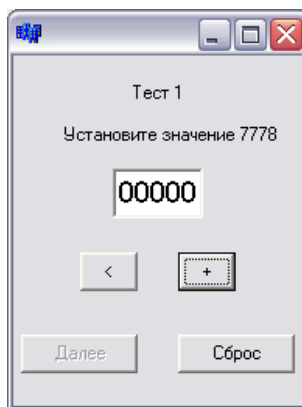


Рис.5. Форма программы-симулятора процесса задания уставок по алгоритму №3

4) Экранная форма программы-симулятора, реализующей четвертый способ задания уставок, представлена на рисунке 6.



Рис.6. Форма программы-симулятора процесса задания уставок по алгоритму №4

При кратковременном нажатии первой кнопки продолжительностью  $T_1$  мс курсор перемещают на один разряд влево относительно выбранного разряда – в сторону старших разрядов, с дальнейшим переходом после последнего разряда на младший разряд. А при удержании данной кнопки продолжительностью более  $T_2$  мс значение выбранного разряда через каждые  $T_3$  мс увеличивают на единицу в цикле от 0 до 9 и далее по кругу.

При кратковременном нажатии второй кнопки продолжительностью  $T_1$  мс курсор перемещают на один разряд вправо относительно выбранного разряда – в сторону младших разрядов, с дальнейшим переходом после последнего разряда на старший разряд. А при удержании кнопки продолжительностью более  $T_2$  мс значение выбранного разряда через каждые  $T_3$  мс уменьшают на единицу в цикле от 9 до 0 и далее по кругу.

Здесь  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  являются параметрами алгоритма. Важно подобрать наиболее оптимальные значения этих параметров, так как при малых значениях параметров становится трудно установить нужное значение выбранного разряда из-за большой скорости как перебора значений в выбранном разряде, так и выбора позиции разряда, а слишком большие значения нецелесообразны, так как приводят к увеличению временных затрат на задание уставок.

Для нахождения параметров оператора был проведен натурный эксперимент с использованием программ-симуляторов. В этом эксперименте приняли участие десять студентов технической специальности. Каждому испытуемому предлагалось установить тридцать значений одних и тех же значений уставок (десять двухзначных, трехзначных и четырехзначных) с помощью описанных выше четырех программ. Результаты эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1. Показатели суммарного времени задания тридцати значений уставок в секундах для разных способов их задания (групп)

| Испытуемый                            | Способ 1 | Способ 2 | Способ 3 | Способ 4 |
|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| 1                                     | 102,2    | 166,4    | 176,4    | 172,9    |
| 2                                     | 116,9    | 181,7    | 181,3    | 198,8    |
| 3                                     | 106,4    | 198,8    | 217,7    | 192,5    |
| 4                                     | 111,3    | 183,4    | 173,6    | 183,4    |
| 5                                     | 110,6    | 207,1    | 213,5    | 181,3    |
| 6                                     | 113,4    | 177,1    | 203,0    | 191,9    |
| 7                                     | 119,0    | 194,6    | 193,9    | 191,4    |
| 8                                     | 103,6    | 186,2    | 202,3    | 201,5    |
| 9                                     | 106,4    | 195,7    | 192,5    | 185,8    |
| 10                                    | 116,2    | 177,9    | 165,2    | 180,6    |
| Суммарное значение времени по столбцу | 1106,0   | 1868,9   | 1919,4   | 1880,1   |

Для выявления тенденции изменения признака (время задания уставки) при переходе от группы к группе воспользуемся  $S$ -критерием Джонкира [2], позволяющим не только выявить изменения, но и подтвердить направление этих изменений. Для этого упорядочим группы по возрастанию средних значений исследуемого признака, перенеся результат в таблицу 2. В этой

таблице, помимо данных из таблицы 1, в графах превышений  $S_i$  для  $j$ -го способа записано количество ячеек во всех столбцах  $X_i$  таблицы для всех способов, находящихся справа от текущей ячейки  $X_i$   $j$ -го способа, значения в которых превышают по величине значение в этой ячейке.

Сформулируем гипотезы:

$H_0$  - тенденция возрастания значений признака при переходе от группы к группе в последовательности 1-2-4-3 является случайной.

$H_1$  - тенденция возрастания значений признака при переходе от группы к группе в последовательности 1-2-4-3 не является случайной.

Подсчитаем общую сумму  $A$  превышений  $S_i$ :  $A = 300 + 106 + 59 = 465$ .

Таблица 2. Расчет S-критерия Джонкира

| №     | Способ 1 |       | Способ 2 |       | Способ 4 |       | Способ 3 |       |
|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|
|       | $X_i$    | $S_i$ | $X_i$    | $S_i$ | $X_i$    | $S_i$ | $X_i$    | $S_i$ |
| 1     | 102,2    | 30    | 169,4    | 19    | 172,9    | 9     | 176,4    |       |
| 2     | 116,9    | 30    | 181,7    | 13    | 198,8    | 4     | 181,3    |       |
| 3     | 106,4    | 30    | 198,8    | 5     | 192,5    | 5     | 217,7    |       |
| 4     | 111,3    | 30    | 183,4    | 12    | 183,4    | 6     | 173,6    |       |
| 5     | 110,6    | 30    | 207,1    | 2     | 181,3    | 6     | 213,5    |       |
| 6     | 113,4    | 30    | 177,1    | 16    | 191,9    | 6     | 203      |       |
| 7     | 119      | 30    | 194,6    | 6     | 191,4    | 6     | 193,9    |       |
| 8     | 103,6    | 30    | 186,2    | 11    | 201,5    | 4     | 202,3    |       |
| 9     | 106,4    | 30    | 195,7    | 6     | 185,8    | 6     | 192,5    |       |
| 10    | 116,2    | 30    | 177,9    | 16    | 180,6    | 7     | 165,2    |       |
| Суммы |          | 300   |          | 106   |          | 59    |          |       |

Для контроля определим максимально возможное значение превышений  $B$ , которое получилось бы в случае, если бы все значения справа были больше значений слева:  $B = c*(c-1)*n^2 / 2 = 600$ , где  $c$  – количество групп (столбцов  $X_i$ ), а  $n$  – количество испытуемых в группе (строк таблицы).

Вычислим эмпирическое значение S-критерия по формуле:  $S_{\text{эмп}} = 2A - B = 330$ .

В соответствии с таблицей критических значений S-критерия Джонкира [2] для найденного значения  $S_{\text{эмп}}$  получим, что  $S_1(p=0,05)=138$  и  $S_2(p=0,01)=195$ , где  $p$  – вероятность принятия неверной гипотезы. На рисунке 7 представлена ось значимости для найденных значений  $S$ . Поскольку эмпирическое значение критерия, равное 330, попало в зону значимости, следовательно, мы можем опровергнуть гипотезу  $H_0$  и принять гипотезу  $H_1$ .

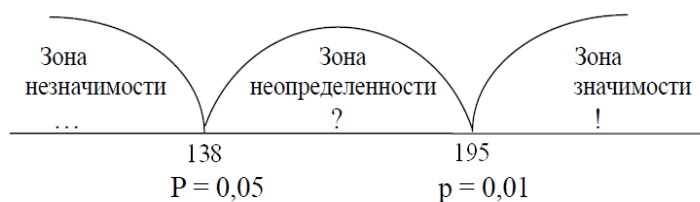


Рис.7. Ось значимости

Проведенный анализ полученных в результате натурального эксперимента log-файлов программой «Анализатор логов» показал, что для модели оператора границы ее параметров лежат в следующих пределах:

- 1) Время выбора действия оператором, 200-500 мс.
- 2) Время перемещения курсора на 1 разряд: 80-250 мс.
- 3) Время задержки после установки значения в разряде: 200-400 мс.
- 4) Вероятность пропустить нужный разряд: 3,1-5,3 %.
- 5) Вероятность пропустить нужное значение в разряде: 7,7-9,5 %.
- 6) Вероятность ошибочного выбора действия перемещения курсора: 1,2-1,9 %.



7) Вероятность ошибочного выбора действия изменения значения разряда: 0,2-0,8 %.

Для проверки адекватности разработанной программы моделирования алгоритмов были проведены десять вычислительных экспериментов по установке тридцати значений уставок (по десять двухзначных, трехзначных и четырехзначных) по четырем вышерассмотренным алгоритмам. В качестве входных данных в программе моделирования алгоритмов случайным образом выбирались значения параметров из интервалов их возможных изменений, полученных из натурального эксперимента. Результаты экспериментов численного моделирования представлены в таблице 3.

Таблица 3. Показатели времени задания тридцати значений, в секундах

| Испытание  | Способ 1 | Моделирование способа 1 | Способ 2 | Моделирование способа 2 | Способ 3 | Моделирование способа 3 | Способ 4 | Моделирование способа 4 |
|------------|----------|-------------------------|----------|-------------------------|----------|-------------------------|----------|-------------------------|
| 1          | 102,2    | 118,1                   | 166,4    | 198,7                   | 176,4    | 206,3                   | 172,9    | 212,2                   |
| 2          | 116,9    | 127,0                   | 181,7    | 202,1                   | 181,3    | 245,3                   | 198,8    | 206,6                   |
| 3          | 106,4    | 120,2                   | 198,8    | 226,7                   | 217,7    | 237,6                   | 192,5    | 212,4                   |
| 4          | 111,3    | 133,4                   | 183,4    | 213,1                   | 173,6    | 217,4                   | 183,4    | 223,4                   |
| 5          | 110,6    | 122,9                   | 207,1    | 208,8                   | 213,5    | 219,5                   | 181,3    | 207,3                   |
| 6          | 113,4    | 141,3                   | 177,1    | 209,7                   | 203,0    | 204,9                   | 191,9    | 221,5                   |
| 7          | 119,0    | 123,8                   | 194,6    | 212,8                   | 193,9    | 211,1                   | 191,4    | 211,9                   |
| 8          | 103,6    | 118,7                   | 186,2    | 210,6                   | 202,3    | 210,6                   | 201,5    | 207,8                   |
| 9          | 106,4    | 130,9                   | 195,7    | 221,9                   | 192,5    | 229,3                   | 185,8    | 220,5                   |
| 10         | 116,2    | 133,4                   | 177,9    | 223,5                   | 165,2    | 223,5                   | 180,6    | 212,0                   |
| Суммы      | 1106,0   | 1269,7                  | 1868,9   | 2127,9                  | 1919,4   | 2205,5                  | 1880,1   | 2135,6                  |
| Отклонение | +15%     |                         | +14%     |                         | +15%     |                         | +13%     |                         |

Для выявления тенденции изменения признака при переходе от группы к группе для данных, полученных в результате моделирования процесса задания уставок также воспользуемся S-критерием Джонкира. Проведя аналогичные расчеты, получим, что  $S_{\text{эмп}} = 340$ , откуда следует, что нужно опровергнуть гипотезу  $H_0$  и принять гипотезу  $H_1$ .

#### Выводы.

1) Анализ результатов натурального эксперимента и результатов вычислительных экспериментов на программе моделирования алгоритмов показал, что тенденция возрастания времени задания уставок при переходе от способа к способу в последовательности 1-2-4-3 не является случайной. При этом разработанная программа моделирования алгоритмов задания уставок адекватна с погрешностью 15%.

2) Анализ данных, полученных с помощью разработанного программного обеспечения, позволяет оптимизировать значения параметров алгоритмов, что приводит к увеличению эффективности алгоритма.

Согласно результатам натурального эксперимента, время реакции разных операторов на изменение значения в разряде составляет 200-400 мс. Поэтому в алгоритме №4 оптимальным периодом времени, через который происходит изменение значения выбранного разряда, является период около 400 мс. При меньшем периоде будет трудно установить нужное значение выбранного разряда из-за большой скорости изменения значения разряда. А увеличение периода нецелесообразно, так как приводит к увеличению временных затрат на задание уставки. Все это позволяет сделать вывод о том, что оптимальными значениями параметров  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  алгоритма № 4 являются значения 400 мс.

3) Для малогабаритных приборов, для которых очень важно минимизировать количество управляющих элементов, наиболее оптимальным является алгоритм № 4, так как в нем, в отличие от алгоритма 1 и 2, используется всего две кнопки, а, в отличие от алгоритма 3, время задания уставок при его применении оказывается меньше в среднем на 0,4 с.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акчурун Э.А. Человеко-машинное взаимодействие: учебное пособие. / Э.А. Акчурун; М.: Солон-Пресс, 2008. – 96 с.

III Научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии»,  
3-5 мая 2012 г.

2. Тарасов С.Г. Основы применения математических методов в психологии: Учебное пособие. СПб.: Изд-во СПб. ун-та, 1999. – 116 с.

**Сведения об авторах:**

**Кожевников С.А.:** Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, аспирант.

**Якунин А.Г.:** Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, доктор технических наук, профессор.

УДК 534.321.8

**СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ОБНАРУЖЕНИЯ НАЗЕМНЫХ  
ВЗРЫВОВ  
(ПЕРЕВОД НАЗВАНИЯ НА АНГЛИЙСКИЙ ЯЗЫК)**

Д.С. Провоторов, А.В. Соловьев  
D. Provotorov, A. Solovyov

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск  
E-mail: Provotorov@sibmail.com

Показана возможность применения сейсмоакустического комплекса для обнаружения сигналов от наземных взрывов. Проведен анализ инфразвуковых сигналов от наземных взрывов. Определены амплитудно-частотные характеристики инфразвуковых сигналов, генерируемых наземными взрывами. Определены направления прихода акустических сигналов от наземных взрывов, проведен спектральный анализ.

(Аннотация на английском языке)

**Ключевые слова:**

Инфразвук, источники инфразвуковых сигналов, наземные взрывы.  
(Infrasound, sources of infrasonic signals, land explosions.)

В настоящее время исследованию низкочастотных акустических сигналов уделяется большее внимание. Изучение низкочастотных акустических сигналов актуально в связи с необходимостью обоснования надежных сигнальных признаков техногенных воздействий (запуски ракет, несанкционированные взрывы и ядерные испытания). Кроме того, результаты этих работ могут быть использованы для идентификации откликов от цунами и предвестников землетрясений.

На сегодняшний день Организация по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний ведет мониторинг сейсмических и инфразвуковых сигналов от ядерных взрывов, но наряду с этим во многих районах земного шара выполняется большой объем горных, дорожных работ, сопровождающихся подземными и наземными взрывами, а также взрывы от деятельности военных, которые не отслеживаются всемирной сетью. Очень важно иметь представление об инфразвуковых сигналах, порождающих наземными взрывами, с целью обнаружения источников этих сигналов.

Целью данной работы является исследование сигналов от наземных взрывов для выявления сигнальных признаков низкочастотных акустических сигналов, разработки методики выделения и определения пеленга на источник.

Исследованию инфразвуковых сигналов от наземных взрывов посвящено большое количество работ. В работе [1] представлены результаты анализа исследования распространения инфразвуковых волн от взрывов. В работе [2] на примере повторяющихся взрывов, происходивших на полигоне в северной Финляндии, проведен анализ вариаций оценок азимутов и кажущихся скоростей приходов звуковых волн на датчики Апатитской группы. Получены оценки точности локации этих взрывов. Показано, что связь между погодными условиями и фактом наличия или отсутствия первого прихода инфразвуковой волны действительно существует. В работе [3] авторами исследованы вариации амплитуды импульсов давления от маломощных наземных взрывов при различных параметрах окружающей среды.

С начала 2010 года в Новосибирской и Кемеровской областях проходит программа уничтожения боеприпасов. Группа информационного обеспечения центрального военного округа сообщила, что специалисты инженерной службы с марта 2010 года вели утилизацию боеприпасов на восьми полигонах Западной Сибири. Как стало известно, в Новосибирской области взрывные работы ведутся на военном полигоне с. Шилова, а в Кемеровской области –

на военном полигоне г. Юрга. Взрывные работы на военных полигонах проводились с 12.00 ч до 19.00 ч по местному времени.

В Томском государственном университете в режиме непрерывного мониторинга ведется регистрация низкочастотных акустических сигналов инфразвукометрическим комплексом. Комплекс включает в себя 3 пространственно-разнесенных микробарометра марки ISGM03, позволяющие регистрировать акустические сигналы в частотном диапазоне от 0.02 до 4 Гц. Размещение измерительных пунктов представляет собой форму треугольника. Расстояние между первым и вторым пунктами регистрации 98 метров, расстояние между вторым и третьим - 276 метров (рис. 1).

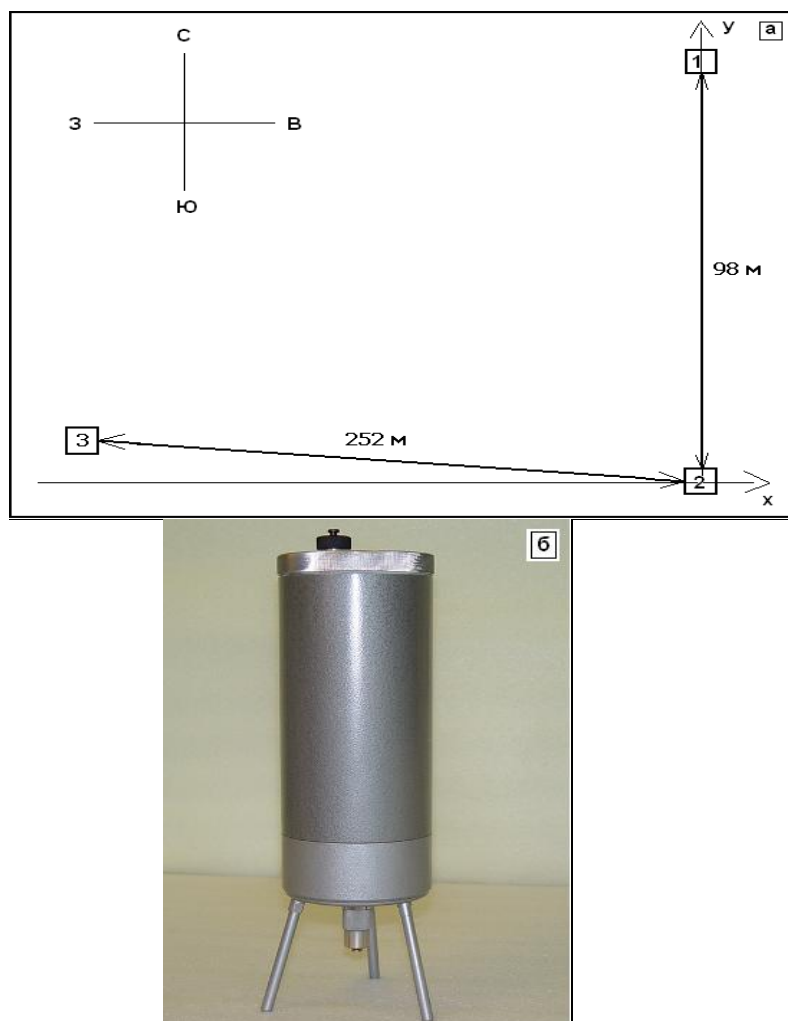


Рис.1. Схема расположения измерительных пунктов (цифрами обозначены измерительные пункты) (а), дифференциальный микробарометр ISGM03 (б).

Сигналы от наземных взрывов, которые проводились в Новосибирской и Кемеровской областях, уверенно фиксировались инфразвукометрическим комплексом. Сигналы были зарегистрированы на всех акустических датчиках. Регистрировались акустические сигналы пакетами, состоящими из 5-10 импульсных сигналов. Длительность одного пакета составляет порядка 10 минут. Время появления сигналов совпадает со временем проведения взрывных работ. В качестве примера на рис. 2 показано время появления и амплитуды от пика до пика инфразвуковых сигналов 25 января 2011 года.

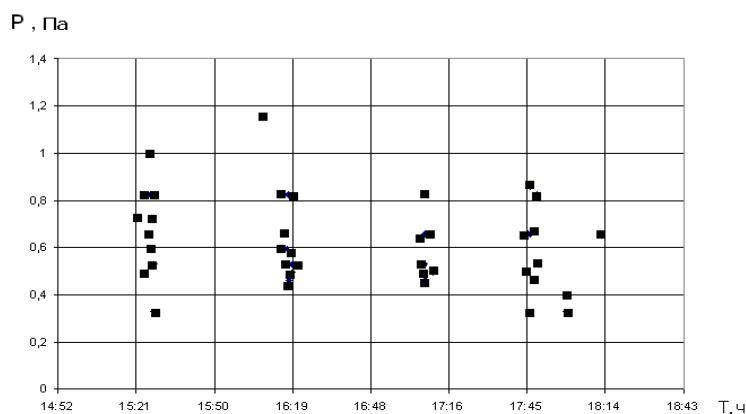


Рис.2. Время появления инфразвуковых сигналов 25 января 2011 года.

Временная форма для всех регистрируемых сигналов имеет схожий вид. Сигнал представляет собой форму цуга, состоящего из 5-10 периодов с постепенно нарастающей и потом убывающей амплитудой и с монотонно уменьшающимся периодом (рис. 3а). Спектральный анализ показал, что усредненный спектр данных сигналов имеет максимум на частоте 1 Гц (рис. 3б).

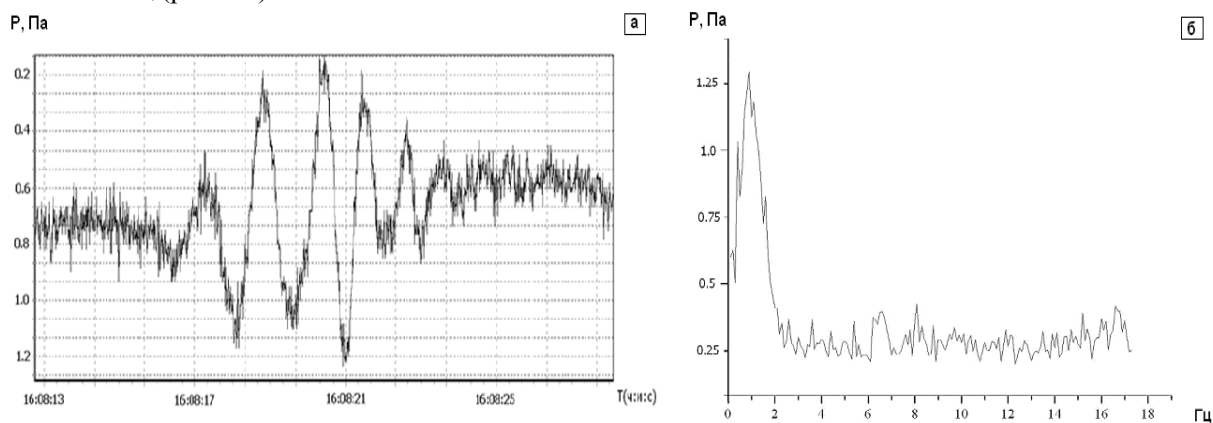


Рис.3. Временная форма инфразвукового сигнала от наземного взрыва, зарегистрированный микробарометром № 2 (а), усредненный спектр инфразвуковых сигналов (б).

Для выделения регистрируемых сигналов от взрывов из шумов, а также для анализа внутренней частотной структуры было использовано Вейвлет - преобразование. В качестве базовой функции Вейвлет - преобразования использовалась функция Морле [4], вид которой наиболее приближен к форме исследуемых сигналов (рис. 4а).

Использование Вейвлет – преобразования с данной базовой функцией позволило однозначно идентифицировать низкочастотные акустические сигналы от наземных взрывов. Типичный вид Вейвлет - преобразования импульсных сигналов от взрывов представлен на рис. 4б. Цветом представлено изменение амплитуды сигналов. Характерной особенностью сигналов от наземных взрывов является монотонное изменение периодов от 1.5 секунды до 0.75 секунды. Вместе с тем в момент максимальной амплитуды акустических сигналов от наземных взрывов проявляются высокочастотные составляющие порядка 0.5 секунды (рис. 4б).

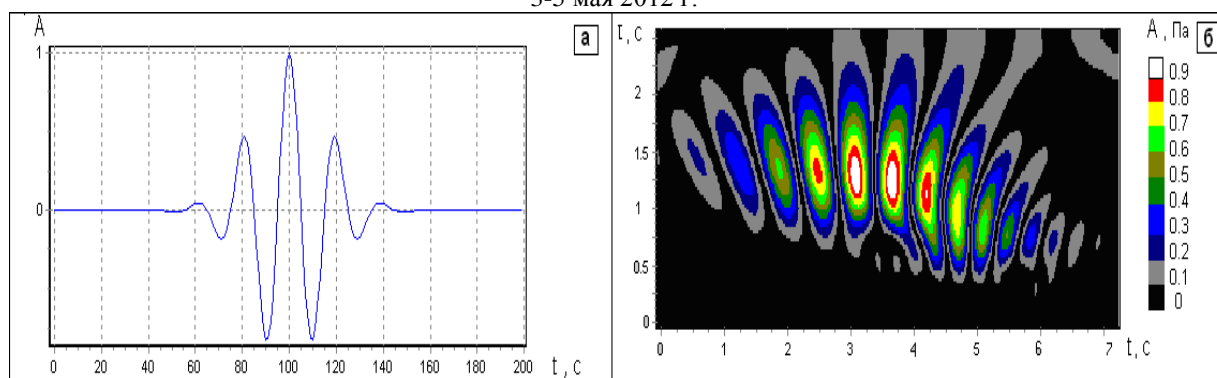


Рис.4. Временное представление базовой Вейвлет функции (Морлет) (а), результат Вейвлет – преобразования сигнала (б).

Анализ амплитуд сигналов от пика до пика показал, что наибольшее количество сигналов наблюдалось с амплитудой от 0.5 до 0.7 Па, с разбросом максимальной амплитуды от пика до пика в пределах от 0.4 до 1.2 Па. Длительность сигналов составляла от 2 до 8 секунд, средняя длительность сигнала 5 секунд (рис. 5).

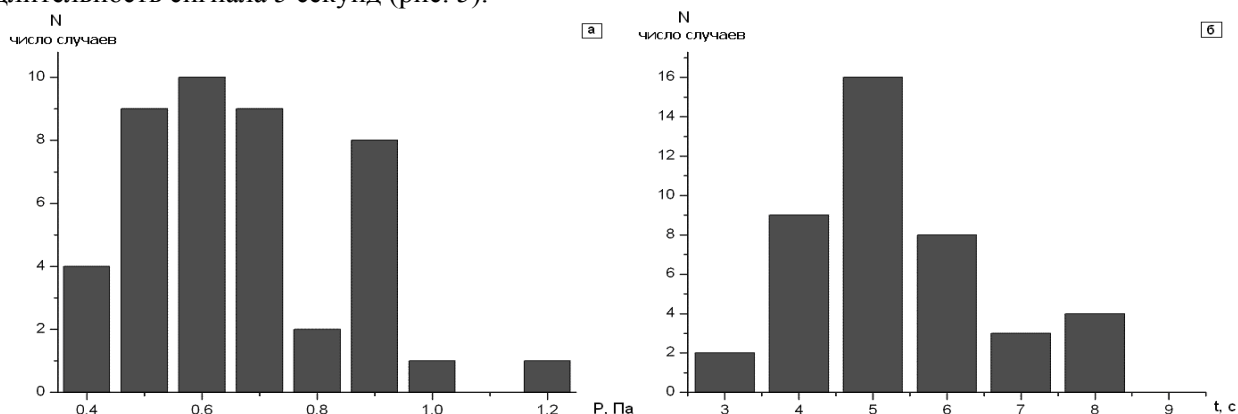


Рис.5. Распределения амплитуд инфразвуковых сигналов от пика до пика (а); распределение длительности сигналов (б).

Для определения направления прихода инфразвуковых волн от взрывов использовался известный метод триангуляции [5], основанный на измерении задержек прихода инфразвукового сигнала на пространственно-разнесенные измерительные пункты. Расчет азимутального прихода акустических сигналов проводился по формуле [6]:

$$\theta = \arctg \frac{\tau_{21}(x_1 - x_2) - \tau_{21}(x_1 - x_3)}{\tau_{23}(y_1 - y_2) - \tau_{23}(y_1 - y_3)},$$

где  $\tau_{21}$  и  $\tau_{23}$  - временные задержки прихода инфразвукового сигнала на 1-й и 3-й измерительные пункты относительно 2-го соответственно (рис. 1);  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_3, y_3)$  – координаты измерительных пунктов декартовой системе координат с центром во 2-м измерительном пункте. Координатные оси абсцисс и ординат совпадают с географическими направлениями Восток-Запад и Север-Юг соответственно (рис. 1).

За весь период наблюдений инфразвуковые сигналы поступали с двух угловых секторов (рис. 6). Наибольшее количество сигналов приходило с углового сектора совпадающим с направлением на полигон с. Шилово Новосибирской области (обозначенный на рисунке желтым цветом). Второй угловой сектор (обозначенный на рисунке красным цветом) совпадает с направлением на полигон вблизи города Юрга Кемеровской области. Следует отметить, что угловой разброс направления прихода инфразвуковых сигналов связан с влиянием метеорологических условий на распространение акустической волны [2, 7]. Расстояние от Шиловского военного полигона до места расположения инфразвукометрического комплекса в городе Томске составляет 254 км, от Юргинского – 96 км. Направления на военные полигоны попадают именно в те угловые секторы, откуда по нашему анализу приходили инфразвуковые сигналы. На карте угол между направлением полигона села Шилово и меридианом земли

относительно точки расположения инфразвукометрического комплекса города Томск равен 220 градусов, угол между направлением полигона города Юрги и меридианом 176 градусов (рис. 6а).

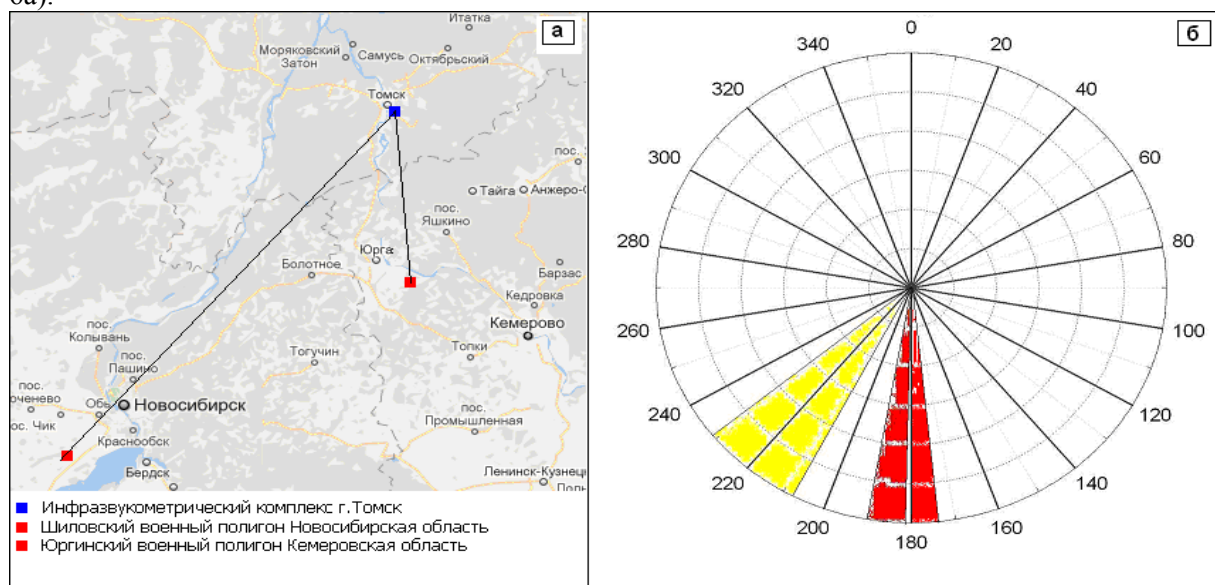


Рис.6. Направление военных полигонов, от которых были зарегистрированы инфразвуковые сигналы (а); угловые сектора прихода сигналов (желтый цвет – сектор угла от 207 до 231 градуса относительно меридиана земли, красный цвет - сектор угла от 175 до 190 градусов относительно меридиана земли).

### Выводы

В результате анализа инфразвуковых сигналов от наземных взрывов были определены амплитудно-частотные характеристики инфразвуковых сигналов, генерируемых наземными взрывами, проводимые на военных полигонах Новосибирской и Кемеровских областях. Типичный вид инфразвуковых сигналов от наземных взрывов представляет собой форму цуга, состоящего из 5-10 периодов с постепенно нарастающей и потом убывающей амплитудой и монотонно уменьшающимся периодом. Среднее значение частотной составляющей имеет максимум на частоте 1 Гц. Использование Вейвлет – преобразования с базовой функцией Морле позволило однозначно идентифицировать низкочастотные акустические сигналы от наземных взрывов. Характерной особенностью сигналов от наземных взрывов является монотонное изменение периодов от 1.5 секунды до 0.75 секунды. Определены направления прихода акустических сигналов, которые указывают на военные полигоны, где проводились взрывные работы. В заключение следует отметить, что результаты измерений на сейсмоакустическом комплексе, показывают, что подобная система способна измерять и регистрировать сигналы для выделения и обнаружения сигналов от наземных взрывов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куличков С.Н. Дальнее распространение звука в атмосфере (обзор) // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 1992. – Т. 28 - № 4 - С. 339-360.
2. Асминг В.Э., Евтюгина З.А., Виноградов Ю.А., Федоров А.В. Анализ инфразвуковых сигналов, генерируемых техногенными источниками // Вестник МГТУ, - 2009. - Т. 12. - №2,– С. 300-307.
3. Рыбнов Ю.С., Кудрявцев В.И., Евменов В.Ф., Экспериментальные исследования влияния приземного слоя атмосферы и подстилающей поверхности на амплитуду слабых воздушных ударных волн от наземных химических взрывов // Физика горения и взрыва, 2004. - Т. 40. - № 6. – С. 98 -100.
4. Астафьева Н.М. Вейвлет – анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук, Т. 166. - № 11. – 123 с.
5. Waldemark K. High Resolution for Infrasound Recording at the Swedish Institute of Space

Physics // Swedish Institute of Space Physics, IRF Scientific Report 242, - 1997. – С. 124-126.

6. Donn W.L. Atmospheric infrasound radiated by bridges // J. Acoust. Soc. Am. -1974. - Vol. 56 - № 5., – С. 1367-1370.

7. Провоторов Д.С., Соловьев А.В., Сорокин А.Г. Связь сезонно-суточных вариаций спектральной плотности инфразвукового фона с метеорологическими величинами // Известия высших учебных заведений Физика 9/3. – Томск: ТГУ, 2010 – С. 227 -228.

**Сведения об авторах:**

**Провоторов Д.С.:** 1987 г.р., г. Томск, мл. науч. сотр. кафедры космической физики и экологии радиофизического факультета Томского государственного университета. Область научных интересов: распространение инфразвуковых волн, источники инфразвуковых волн, связь инфразвукового фона с метеорологическими величинами.

**Соловьев А.В.:** 1974 г.р., г. Томск, канд. техн. наук, доцент кафедры космической физики и экологии радиофизического факультета Томского государственного университета. Область научных интересов: распространение инфразвуковых волн, инфразвуковые шумы, влияние инфразвука на организм человека.



## СИСТЕМА КОНТРОЛЯ СООСНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ (ALIGNMENT CONTROL SYSTEM FOR JOINT WELDING OF DRILL PIPES)

Д.В. Вахрушев, А.Е. Гольдштейн, Е.В. Якимов  
D. V. Vakhrushev, A. E. Goldstein, E. V. Yakimov

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Кафедра ИИТ, ТПУ, г.Томск.  
E-mail: vdv@tpu.ru

В работе описан принцип измерения отклонения от соосности сварных соединений бурильных труб и особенности систем контроля соосности СКС 10.02 и СКС 10.03 разработанных для ОАО «Завод бурового оборудования» (г. Оренбург).

(In this paper we describe the principle of measuring the deviation from alignment for joint welding of drill pipes and alignment features of control systems СКС 10.02 and СКС 10.03 designed to "Drilling equipment manufacturer" (Orenburg city).)

### Ключевые слова:

Бурильные трубы, приваренные замки, соосность, система контроля, взаимоиндуктивный преобразователь, беспроводный интерфейс.

(Drill pipes, welded locks, alignment, control system, wireless, inductive sensor.)

### Измерение несоосности

Качество и эффективность буровых работ, проводимых в различных производственных сферах, в большой мере зависят от качества используемого бурового оборудования, в том числе бурильных труб. Ведущее место в обширной номенклатуре бурильных труб занимают трубы стальные с приваренными замками. Конструктивно такие трубы состоят из трех элементов: тела трубы и двух замков – муфты и ниппеля, приваренных к телу трубы методом сварки трением [2]. Важной характеристикой сварных соединений бурильных труб, в значительной мере определяющей трудоемкость и точность бурения, срок службы бурового оборудования является соосность приваренных замков и тела трубы.

В соответствии с [1] контроль соосности заключается в измерении при вращении трубы радиальных биений замковой части трубы относительно оси тела бурильной трубы в двух сечениях, первое из которых расположено вблизи сварного соединения, а второе – вблизи торца замковой части трубы. Параллельное, мм и угловое, мм/100мм отклонения от соосности определяются по формулам:

$$a_1 = \frac{\delta_1}{2}, \quad a_2 = \frac{\delta_2 - \delta_1}{2 \cdot L} \cdot 100 \quad (1)$$

где  $\delta_1$  – биение в сечении 1, мм;  $\delta_2$  – биение в сечении 2, мм;  $L$  – расстояние между сечениями, мм.

Измеренные значения отклонений от соосности  $a_1$  и  $a_2$  сравниваются с их предельно допустимыми значениями.

В целях автоматизации процесса измерения соосности на кафедре информационно-измерительной техники ТПУ разработана система контроля соосности СКС 10.02 [2]. В производственных условиях система контроля устанавливается на линии изготовления бурильных труб на участках сварки трением, температурного отпуска сварного соединения, технического контроля готовой продукции.

Для проверки качества на кафедре информационно-измерительной техники Томского политехнического университета разработана система контроля соосности СКС 10.02, являющаяся рабочим средством контроля соосности приваренных замков бурильных труб в процессе их производства, а также в процессе их эксплуатации [2].

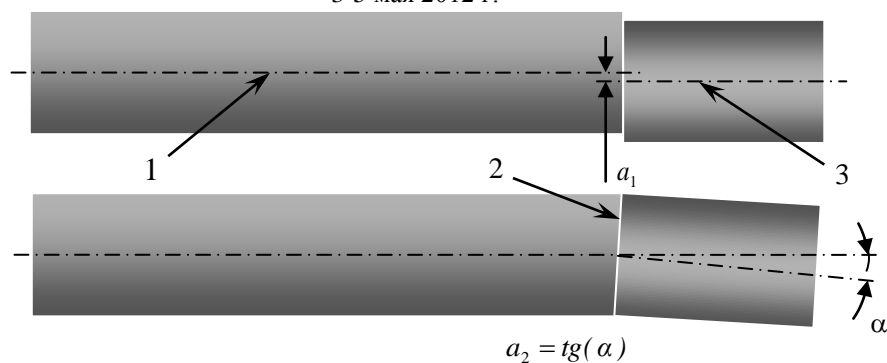


Рис. 1. Отклонение от соосности приваренных замков и тела трубы:  
 $a_1$  – параллельное отклонение от соосности;  $a_2$  – угловое отклонение от соосности; 1 – ось тела бурильной трубы; 2 – ось замка; 3 – сварной шев.

Основными элементами конструкции измерительного блока являются основание, устанавливаемое при проведении контроля на тело трубы, штанга с закрепленными на ней цифровыми индикаторами часового типа и корпус, в котором размещена плата микроконтроллера, осуществляющего преобразование выходных сигналов индикаторов для передачи по интерфейсу RS 232 в электронный блок.

#### Система контроля соосности с индикаторами часового типа

В известных реализациях описанного метода контроля как измерительные, так и вычислительные операции, а также протоколирование результатов контроля осуществляются непосредственно самим контролером-оператором, что определяет высокий уровень влияния субъективного фактора на результаты контроля, его трудоемкость и низкую производительность. В целях устранения указанных недостатков на кафедре информационно-измерительной техники Томского политехнического университета разработана система контроля соосности СКС 10.02 [2], являющаяся рабочим средством контроля соосности приваренных замков бурильных труб в процессе их производства в соответствии с [1], а также в процессе их эксплуатации. В производственных условиях система контроля устанавливается на линии изготовления бурильных труб на участках сварки трением, температурного отпуска сварного соединения, технического контроля готовой продукции.

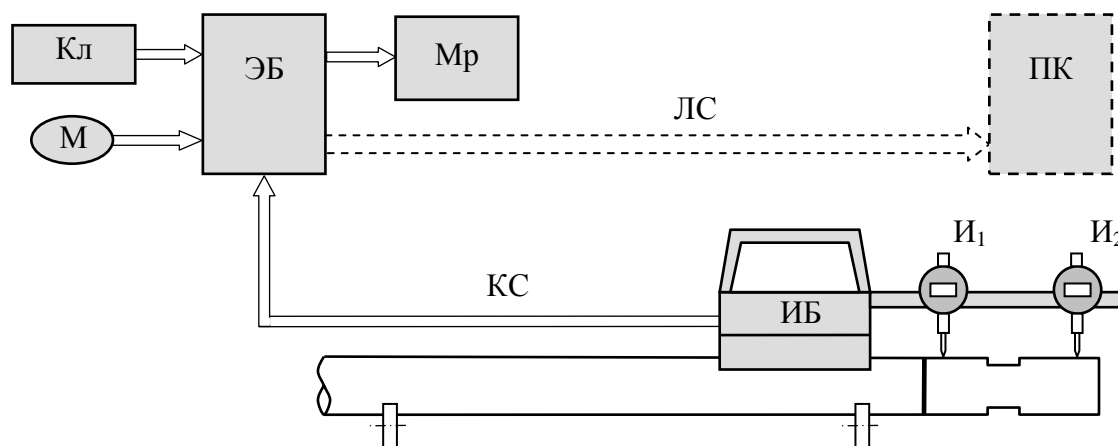


Рис. 2. Структурная схема системы контроля соосности СКС 10.02:  
ИБ – измерительный блок; И<sub>1</sub>, И<sub>2</sub> – индикаторы часового типа; ЭБ – электронный блок; Кл – клавиатура; М – мышь; Мр – монитор; КС – кабель связи; ЛС – локальная сеть; ПК – персональный компьютер диспетчера.

Основными функциями системы контроля являются:

- измерение значений параллельного и углового отклонений от соосности сварного соединения;
- сравнение измеренных значений отклонений с предельно допустимыми;
- индикация результатов измерения и контроля;

• хранение результатов контроля и их передача на рабочее место диспетчера через информационную сеть цеха.

На индикаторную панель системы выводится следующая информация:

- номера контролируемой трубы и ее сварного соединения;
- порядковый номер измерения отклонений от соосности для данного сварного соединения (при многократных измерениях);
- дата и время измерения;
- наружный диаметр трубы, мм;
- значение базового расстояния, используемого при измерении угловой несоосности, мм
- предельно допустимое значение параллельного отклонения от соосности, мм;
- предельно допустимое значение углового отклонения от соосности, мм/100 мм;
- результат измерения значения параллельного отклонения от соосности сварного соединения, мм;
- результат измерения значения углового отклонения от соосности сварного соединения, мм/100 мм;
- результат контроля (годен/бракован);
- преобразованные в аналоговую форму показания индикатора угловых отклонений от соосности (для определения азимута оси максимальных радиальных биений).

Все результаты контроля передаются через информационную сеть цеха на персональный компьютер рабочего места диспетчера, а, кроме того, результаты контроля сохраняются в памяти электронного блока.

Структурная схема системы контроля приведена на рисунке 2. Система контроля содержит два основных блока: измерительный блок (ИБ) и электронный блок (ЭБ) с подключенными к нему периферийными устройствами – монитором (Мр), клавиатурой (Кл) и мышью (М). Измерительный и электронный блоки соединены между собой кабелем связи (КС).

Измерение отклонений от соосности осуществляется следующим образом. Цикл измерения запускается автоматически при установке измерительного блока на контролируемую бурильную трубу в месте стыка тела трубы и ее замковой части. В процессе измерения осуществляется вращение трубы на ножевых вращающихся опорах. Измерительный блок при вращении трубы удерживается на месте, но остается в постоянном контакте с поверхностью тела трубы через опорные подшипники и с поверхностью замковой части трубы через измерительные стержни двух индикаторов часового типа  $I_1$  и  $I_2$ . Показание (выходной сигнал) индикатора  $x$  определяется в этом случае суммой начального показания  $x_0$  (до начала вращения трубы) и приращения  $\Delta x$ , обусловленного перемещением измерительного стержня индикатора вследствие возможной несоосности замковой части трубы относительно оси тела трубы:

$$x_1 = x_{01} + \Delta x_1; \quad x_2 = x_{02} + \Delta x_2, \quad (2)$$

где  $x_1$  и  $x_2$ ,  $x_{01}$  и  $x_{02}$ ,  $\Delta x_1$  и  $\Delta x_2$  – текущие, начальные показания и приращения показаний соответственно первого и второго индикаторов.

Для обеспечения максимальной достоверности результатов контроля сечение трубы, в котором производятся измерения первым индикатором, должно быть максимально приближено к плоскости сварного шва, а сечение трубы, в котором производятся измерения вторым индикатором, максимально приближено к торцу замковой части трубы.

Выходные сигналы индикаторов  $x_1$  и  $x_2$  преобразуются контроллером измерительного блока в форму, пригодную для передачи по интерфейсу RS-232, и передаются через кабель связи КС на вход электронного блока ЭБ.

В электронном блоке, основой которого является персональный компьютер с периферийными устройствами, осуществляется запись массивов значений сигналов  $x_1$  и  $x_2$ , соответствующих различным углам поворота контролируемой трубы в диапазоне от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ , и определение минимальных  $x_{1min}$  и  $x_{2min}$  и максимальных  $x_{1max}$  и  $x_{2max}$  значений сигналов из этих массивов.

Значения радиальных биений в первом и втором сечениях замковой части трубы  $\delta_1$  и  $\delta_2$  определяются следующим образом:

$$\delta_1 = x_{1max} - x_{1min}; \quad \delta_2 = x_{2max} - x_{2min}. \quad (3)$$

Далее производится вычисление значений параллельного  $a_1$  и углового  $a_2$ , отклонений от соосности по формулам (1) и сравнение полученных значений с предельно допустимыми.

В процессе контроля вычисляются значения приращения показаний первого и второго индикаторов  $\Delta x_1$  и  $\Delta x_2$ , которые в реальном времени отображаются в аналоговой форме на индикаторной панели системы.

Результаты контроля заносятся в электронный протокол контроля, выводятся на индикаторную панель, а также передаются по локальной сети ЛС на персональный компьютер диспетчера.

Основными элементами конструкции измерительного блока (рис. 3) являются основание, устанавливаемое при проведении контроля на тело трубы, штанга с закрепленными на ней цифровыми индикаторами часового типа и корпус, в котором размещена плата микроконтроллера, осуществляющего преобразование выходных сигналов индикаторов для передачи по интерфейсу RS-232 в электронный блок. Для облегчения движения основания по телу трубы используются шарикоподшипники.

Для обработки сигналов измерительной информации, ее хранения и визуализации, осуществляемых в электронном блоке, разработана специальная программа. На рис. 4 показана лицевая панель программы с пользовательским интерфейсом оператора.

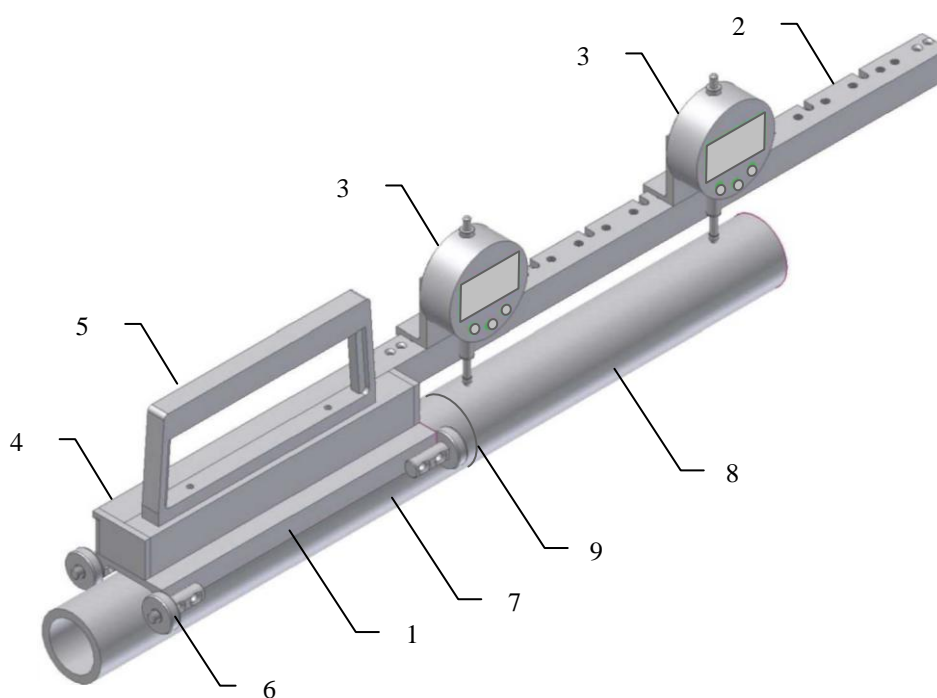


Рис. 3. Конструкция измерительного блока 10.02: 1 – основание; 2 – штанга; 3 – индикаторы; 4 – корпус; 5 – ручка; 6 – подшипники; 7 – тело трубы; 8 – приваренный замок; 9 – сварной шов.

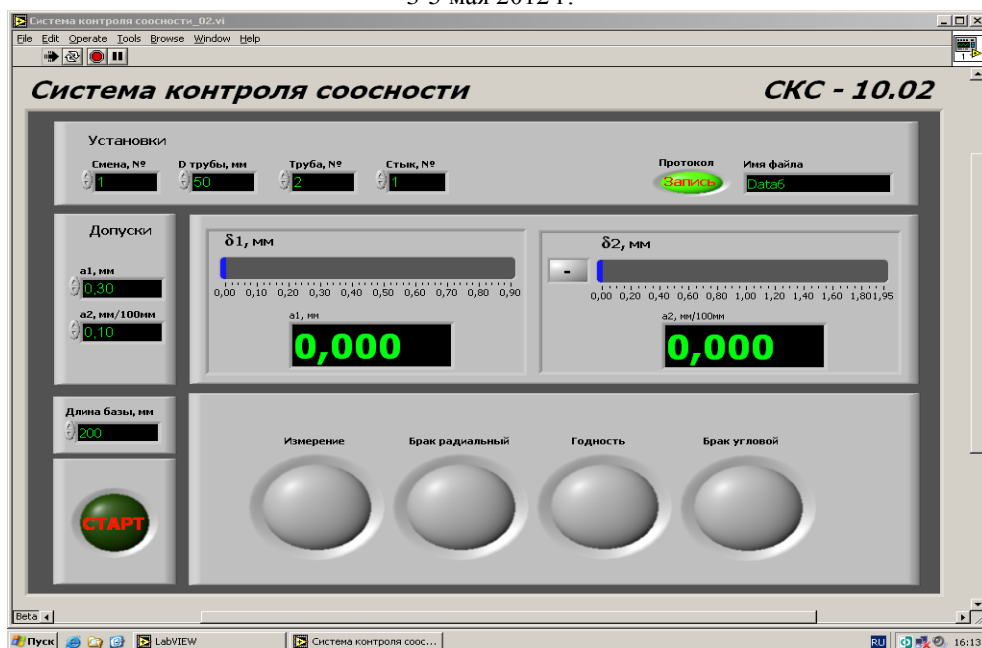


Рис. 4. Интерфейс оператора системы контроля соосности.

Ниже приводятся основные технические характеристики системы контроля SKS 10.02

- наружный диаметр свариваемых заготовок – от 43 мм до 108 мм
- диапазон измеряемых значений параллельного отклонения от соосности – 0...2 мм;
- диапазон измеряемых значений углового отклонения от соосности – 0...10 мм/м;
- максимальная база измерения углового отклонения от соосности – 350 мм;
- допустимая погрешность измерения параллельного отклонения от соосности  $\pm 0.05$  мм;
- допустимая погрешность измерения углового отклонения от соосности  $\pm 0.25$  мм/м

В 2009 году разработанная система контроля соосности SKS 10.02 была установлена в трубном цехе ОАО «Завод бурового оборудования» (г. Оренбург).

Двухлетний период успешной эксплуатации системы контроля подтвердил ее высокие технические характеристики, однако выявил и необходимость дальнейшей модернизации системы с целью повышения надежности и удобства проведения операций контроля.

Основными направлениями модернизации системы контроля являлись замена кабеля связи измерительного и электронного блоков системы контроля на беспроводный интерфейс (радиоканал), а также замена контактных преобразователей биений трубы (цифровых индикаторов часового типа) на бесконтактные магнитные взаимоиндуктивные измерительные преобразователи.

#### **Система контроля соосности с беспроводным интерфейсом**

Организация связи измерительного блока с электронным блоком беспроводным интерфейсом (Bluetooth, радиоканал и др.), позволяет обойтись без соединительного кабеля (КС на рисунке 2), повышающего удобство эксплуатации системы на рабочем месте.

Выбор беспроводной связи был сделан в пользу популярной и распространенной среди пользователей ПК, радио-трансивера по спецификации Bluetooth. Популярность и распространенность обуславливает надежность выбранного интерфейса. Данная спецификация протокола была разработана для работы в персональных беспроводных сетях. В качестве устройств используют такие устройства как: мобильные телефоны, принтеры, цифровые аппараты, медицинская и измерительная техника. Прибор беспроводной SKS компактен и подходит по описанию спецификации как прибор входящий в персональную сеть. Так же распространенность Bluetooth делает простым процесс сопряжения устройства с ПК, как для разработчика в процессе отладки, так и для конечного пользователя.

Так же на рынке имеются современные готовые модули беспроводной связи Bluetooth, которые имеют аппаратную реализацию защиты от помех, малое потребление, большой набор программных средств и документации для разработки программного обеспечения, как на ПК, так и на стороне устройства.

В качестве Bluetooth модуля был выбран модуль WT12. В модуле имеется встроенный контроллер, позволяющий произвести подходящую настройку модуля. В системе контроля модуль Bluetooth программируется для использования его в режиме Serial Port Profile (SPP) – эмулирует последовательный порт, предоставляя возможность замены стандартного RS-232 беспроводным соединением. Радиус действия используемого модуля составляет 15–20 м.

Беспроводный интерфейс в системе контроля соосности требует особых решений при организации питания. В частности питание блока измерения должно быть автономным, иметь возможность подзарядки, обеспечивать возможность непрерывной работы в течение рабочего дня (не менее 8 ч.), использования доступных аккумуляторных батарей. В качестве таких батарей были выбраны распространенные аккумуляторы типоразмера АА.

Питания микроконтроллера, модуля и индикаторов часового типа осуществлялось с использованием трех управляемых источников питания: два на напряжение 3.3 В и один на напряжение питания индикаторов 1.5 В. Для повышения напряжения с двух аккумуляторных батарей до 3.3 В понадобилось использовать специализированный импульсный повышающий преобразователь. Выбор системы питания с тремя управляемыми источниками питания, потребовалось для возможности контроля расхода энергии аккумуляторов. Данная схема питания позволила разработать режимы работы прибора, как автономный прибор измерения с отображением на индикаторах, прибора как компьютерного средства измерения и режима пониженного энергопотребления в котором контроллер находился в спящем состоянии и мог сохранить заряд аккумулятора на продолжительный период времени при использовании одной кнопки для управления прибором.

Проведенный макет прибора, позволил вести как непрерывную работу прибора в течении 12 часов без сбоев.

Программное обеспечение было взято за основу от прибора СКС 10.02 с доработкой формата передачи данных, в котором была учтена возможность управления энергопотреблением прибора с ПК.

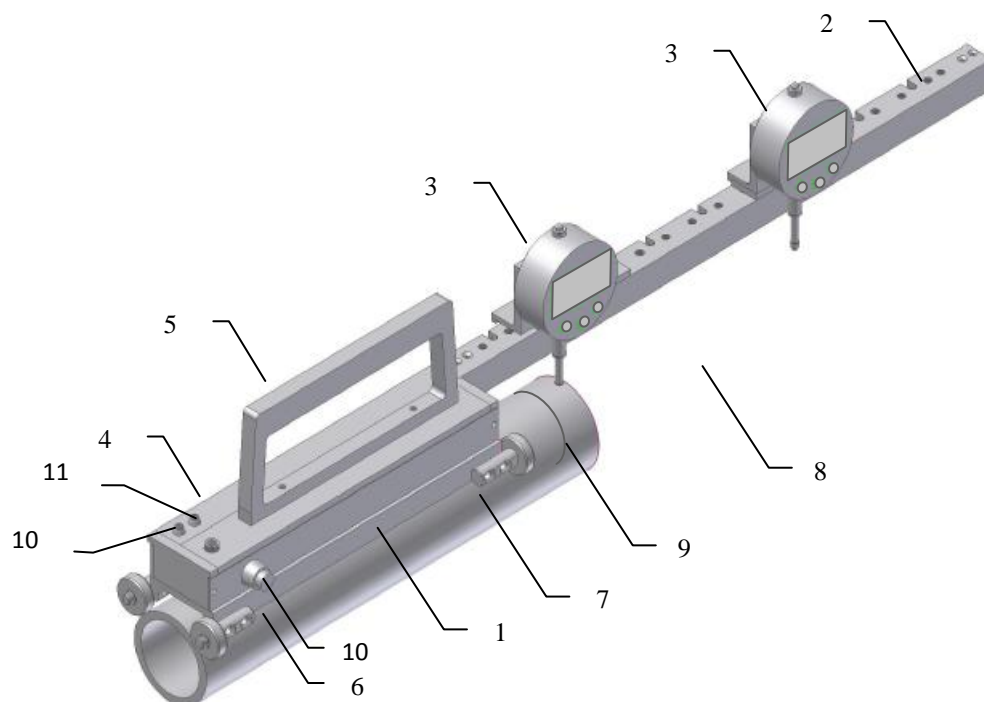


Рис. 5. Конструкция измерительного блока СКС 10.03: 1 – основание; 2 – штанга; 3 – индикаторы; 4 – корпус; 5 – ручка; 6 – подшипники; 7 – тело трубы; 8 – приваренный замок; 9 – сварной шов; 10 – кнопка управления; 11 – индикация состояния аккумулятора; 12 – индикация процесса измерения.

### **Система контроля соосности с бесконтактными преобразователями**

Существенным направлением модернизации является отказ от контактных методов контроля (с использованием цифровых индикаторов часового типа) в пользу бесконтактных методов. В этом случае повышается надежность системы, поскольку отсутствует контакт

измерительного штока индикатора и трубы, а также становится шире диапазон рабочих температур.

В качестве бесконтактных преобразователей биений трубы в электрический сигнал были выбраны взаимоиндуктивные измерительные преобразователи. На рисунке 6 схематично показана конструкция используемого взаимоиндуктивного преобразователя [4].

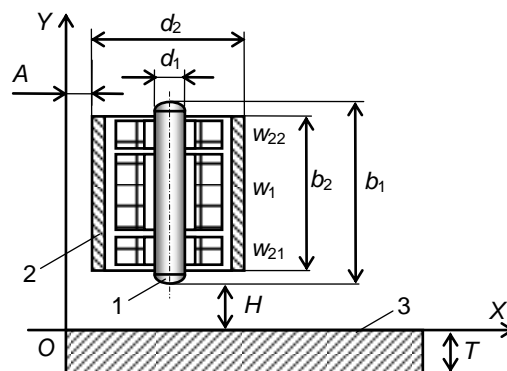


Рис. 6. Конструкция взаимоиндуктивного преобразователя.

Составными элементами взаимоиндуктивного преобразователя являются обмотка возбуждения  $w_1$ , измерительная обмотка с двумя встречно включенными секциями  $w_{21}$  и  $w_{22}$ , а также ферромагнитный сердечник 1 и ферромагнитный цилиндрический экран 2, образующие магнитную цепь преобразователя. Практически неиспользуемый в аналогичных по назначению и конструкции преобразователях магнитных толщиномеров цилиндрический экран необходим в данном случае для исключения влияния находящихся в окружении преобразователя металлических деталей (например, элементов крепления).

В отсутствие вблизи преобразователя ферромагнитных объектов выходное напряжение измерительной обмотки равно нулю, что обусловлено равенством по модулю потокосцепления магнитного поля обмотки возбуждения и встречно включенных секций измерительной обмотки.

При наличии вблизи торцевой части преобразователя ферромагнитного объекта 3 происходит перераспределение магнитных потоков через секции измерительной обмотки, что приводит к появлению напряжения разбаланса (вносимого напряжения)  $U_2$  измерительной обмотки. Это напряжение функционально связано с расстоянием  $H$  до поверхности объекта нелинейной функцией преобразования  $U_2(H)$ . Степень нелинейности функции преобразования определяется конструктивными параметрами преобразователя.

Другим фактором, влияющим на значение напряжения  $U_2$ , является расстояние  $A$  до края ферромагнитного объекта (рис. 6). Существенное влияние данного фактора при использовании предлагаемого преобразователя для контроля соосности обусловлено конструктивными особенностями замковой части бурильной трубы, заключающимися в относительно малом расстоянии от торца замка до прорезей под ключ и, следовательно, в необходимости проведения контроля в условиях потенциально возможного проявления краевого эффекта.

В соответствии с вышесказанным, основными критериями при выборе конструктивных параметров взаимоиндуктивного преобразователя – длины и диаметра сердечника  $b_1$  и  $d_1$ , длины и диаметра экрана  $b_2$  и  $d_2$ , диаметра среднего витка обмоток  $d_0$ , являлись степень нелинейности функции преобразования  $U_2(H)$  и степень влияния на результат преобразования расстояния преобразователя до края объекта.

Для анализа влияния на функцию преобразования основных факторов был использован пакет моделирования COMSOL Multiphysics, позволяющий решать задачи, в том числе, из области электромагнетизма путем численного решения уравнений в частных производных методом конечных элементов. Построенная трехмерная модель преобразователя позволила осуществить анализ влияния на его функцию преобразования, как основных конструктивных параметров, так и оценить влияние на результаты преобразования краевого эффекта.

В качестве примера на рис. 7 показана рассчитанная с помощью COMSOL топография магнитного поля преобразователя при взаимодействии с плоским объектом при удалении от края объекта и вблизи края.

На рис. 8 приведены результаты моделирования влияния на функцию преобразования цилиндрического экрана. Здесь представлены зависимости вносимого объектом относительного изменения выходного напряжения  $\Delta U_2^*$  (нормированного по значению начального напряжения одной секции измерительной обмотки) от расстояния  $H$  до поверхности объекта при отсутствии экрана (кривая 1) и при наличии экрана (кривая 2). Для второго случая построена также экспериментальная зависимость (кривая 3). Анализ этих результатов показывает, что наличие экрана приводит к некоторому увеличению степени нелинейности функции преобразования, но это увеличение может быть минимизировано уменьшением длины экрана по сравнению с длиной сердечника на  $(15 \div 20)\%$ .

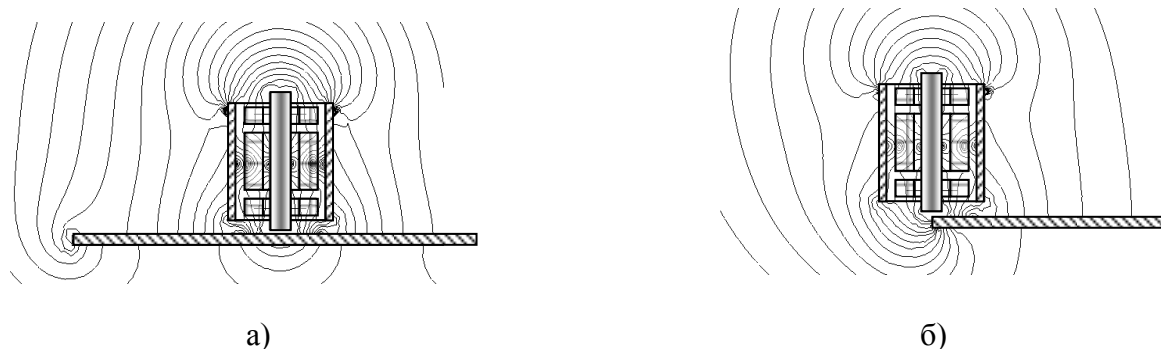


Рис. 7. Линии одинаковой индукции магнитного поля взаимоиндуктивного преобразователя при взаимодействии с плоским объектом при удалении от края объекта (а) и вблизи края (б).

Результаты математического и физического моделирования отличаются незначительно. Некоторое их расхождение обусловлено недостаточно качественной стабилизацией при эксперименте тока возбуждения.

На рисунке 8 приведены результаты моделирования краевого эффекта. Здесь представлены зависимости относительного вносимого напряжения  $\Delta U_2^*$  от расстояния  $A$  до поверхности объекта при отсутствии экрана (кривая 1) и при наличии экрана (кривая 2). Анализ этих результатов показывает, что для используемой конструкции преобразователя краевой эффект проявляется незначительно даже при установке преобразователя на самый край объекта. Влияние экрана на характер зависимости  $\Delta U_2^*$  незначительно.

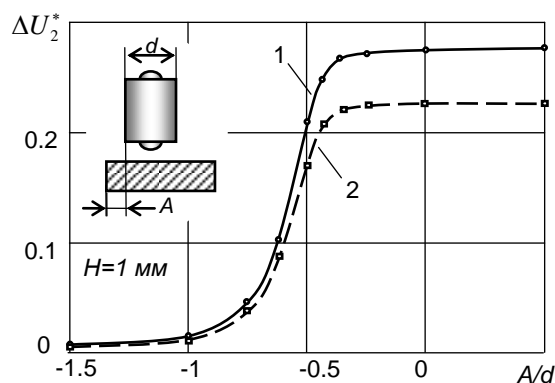


Рис. 8. Зависимость относительного вносимого напряжения преобразователя от расстояния до края объекта

Анализ других полученных математическим моделированием результатов показал, что оптимальные соотношения конструктивных параметров преобразователя следующие:

$$\begin{aligned} b_1 &= (1,5 \div 2,5) d_o; & d_1 &= (0,3 \div 0,4) d_o; \\ b_2 &= (0,75 \div 0,85) b_1; & d_2 &= (1,8 \div 2) d_o. \end{aligned} \quad (4)$$

#### Заключение

В настоящий момент на кафедре информационно-измерительной техники Томского политехнического университета получены положительные результаты по всем перечисленным



направлениям модернизации, и могут быть предложены различные варианты систем контроля соосности приваренных замков бурильных труб:

- система контроля соосности на основе цифровых индикаторов часового типа с кабелем связи (СКС 10.02);
- система контроля соосности на основе цифровых индикаторов часового типа с беспроводным интерфейсом (СКС 10.03);
- бесконтактная система контроля соосности с кабелем связи;
- бесконтактная система контроля соосности с беспроводным интерфейсом.

Имеющиеся технические решения могут быть использованы для измерения отклонения от прямолинейности трубы, поскольку при этом используется такой же принцип измерения биения тела трубы относительно мерной базы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 51245-99 "Трубы бурильные стальные универсальные. Общие технические условия"
2. Гольдштейн А.Е., Якимов Е.В. Измерение отклонения от соосности сварных соединений бурильных труб. // Ползуновский вестник, 2010, № 2, с. 65-69.
3. Гольдштейн А.Е., Уразбеков Е.И., Якимов Е.В. Система контроля соосности приваренных замков бурильных труб //Становление и развитие научных исследований в высшей школе: Сборник трудов Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора А.А.Воробьева — Томск, ТПУ, 14-16 сентября 2009. — Томск: Изд. ТПУ, 2009. — с. 51-56 (31301557)
4. Алимов Д. В. , Вахрушев Д. В. , Гольдштейн А. Е. , Якимов Е. В. «Бесконтактная система контроля соосности с беспроводным интерфейсом»

**Сведения об авторах:**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИБОРА НА ОСНОВЕ  
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ  
АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ  
(EXPERIMENTAL MODEL ON THE BASIS OF THE PIEZOELECTRIC  
CONVERTER FOR ARTERIAL PRESSURE MEASURING)**

Е.И. Шкляр, Д.В. Миляев  
E.I. Shklyar, D.V. Milyaev

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
E-mail: shklyar.e.i@mail.ru

В статье приведены исследования экспериментального макета, измеряющего динамику изменения артериального давления при возрастающих нагрузках на сердечную мышцу. Устройство способно непрерывно определять мгновенные значения давления при нагрузках и при восстановлении давления на переходе к спокойному состоянию. Требования, предъявляемые к прибору такого типа, в основном сводятся не к повышению точности измерения, а его компактности, возможности непрерывного измерения и демонстрации диаграммы кривой давления в течение дня, недели и более.

(The experimental model to measure the dynamic of change in blood pressure during exercises for the heart muscle has been designed. The device continuously defines instant values of arterial pressure during exercises and in pressure recovery at rest. The requirements for this type of device concern not the measurement accuracy, but its compact size, possibility of continuous measurement and illustration of the diagram for pressure curve within a day, week, etc.)

**Ключевые слова:**

Артериальное давление, пьезоэлектрический преобразователь, медицина, измерение.  
(Arterial pressure, piezoelectric converter, medicine, measurement.)

**1. Введение**

В мире медицине существует огромное количество различных приборов и средств измерения для выяснения болезней сердца и сердечнососудистых заболеваний. Одной из самых острых проблем, стоящей перед врачами, является выбор универсального точного устройства, которое верно, а самое главное быстро выявит болезнь пациента на ранних стадиях заболевания. Традиционно принятые при обследовании пациентов разовые измерения артериального давления (АД) не всегда отражают истинные его величины, не дают представления о суточной динамике, поэтому затрудняется диагностика артериальной гипертензии, подбор антигипертензивных препаратов, оценка их эффективности и адекватность лечения.

**2. Методы измерения АД**

В современном мире существует несколько методов измерения АД, все они делятся на инвазивные и неинвазивные. Применение инвазивного метода практически не используется на практике, его применяют только в экстренных случаях для диагностики работы сердца. Неинвазивные методы нашли широкое применение в медицине.

***Аускультативный метод:***

Метод основан на полном пережатии манжетой плечевой артерии и выслушивании тонов, возникающих при медленном выпуске воздуха из манжеты.

***Осциллометрический метод:***

Он основан на регистрации прибором пульсаций давления воздуха, возникающих в манжете при прохождении крови через сдавленный манжетой участок артерии.

***Безманжетные методы:***

Настоятельная необходимость в безманжетных средствах для мониторингового неинвазивного контроля АД стимулирует непрекращающиеся попытки создания подобной аппаратуры. В основе опытных разработок этого направления лежат исследования возможностей использования тех или иных функциональных зависимостей, которые могли бы связывать величину АД с каким-либо физиологическим параметром, регистрируемым неинвазивно. В свою очередь безманжетные методы делятся на:

фотоплетизмографический (оптический)  
импедансно-плетизмографический  
механический

**Фотоплетизмографический (оптический) метод:**

В основу методики положено изменение сосудистых артериальных рефлексов при различных положениях конечности - превалирование сосудорасширяющего рефлекса при поднятии конечности вверх, при опускании конечности вниз превалирует сосудосуживающий рефлекс. Метод основан на преобразовании давления (Р) в силу (F) и измерении параметров пульсовой волны одновременно с измерением значений давления. Поскольку

$$P = \frac{F}{S}$$

где S — площадь поверхности, то, задаваясь определенным, заранее выбранным значением, мы получаем, что  $P \sim F$ . Если мы будем использовать датчик силы, с определенной площадью поверхности на который мы будем воздействовать артерией, то мы получим значения силы F, пропорциональные значению давления P. В этом качестве удобно использовать пальцевую артерию. Мы надавливаем пальцем (а точнее, пальцевой подушечкой, где находится пальцевая артерия) на датчик силы и при этом одновременно измеряем пульсовую волну с помощью фотоэлектрического датчика, состоящего из светодиода и приемного фотодиода.

**Метод импедансной плетизмографии:**

При определении параметров артериального давления (АД) крови, а именно, его систолического  $P_s$  и диастолического  $P_d$  давлений, импедансная плетизмография позволяет получить кривую изменения сопротивления участка тела человека, так называемую реограмму. Реографический метод измерения параметров АД является сравнительно новым направлением в оценке качества функционирования сердечно-сосудистой системы человека, методически он еще недостаточно разработан и освещен в публикациях. Ему присущи такие основные недостатки как: большая методическая погрешность 20 -30% и все неудобства и нежелательные последствия от использования окклюзионной манжеты. Причиной большой методической погрешности определения значений  $P_s$  и  $P_d$  АД является наложение на реограмму давления волновых процессов второго и третьего порядков, обусловленных работой других органов человека, в том числе легких и печени.

**Механический метод:**

Для исследования тонов и шумов сердца и записи фонокардиограмм применяются электродинамические и пьезоэлектрические микрофоны.

Тонометр на основе пьезоэлектрического преобразователя сможет решить сложившуюся ситуацию в медицине. Суть метода заключается в измерении напряжения, которое возникает в преобразователе после прохождения пульсовой волны, определенной силы. Зависимость напряжения на преобразователе от давления человека вычисляется математическим способом.

**3. Математическая модель устройства**

Рассмотрим зависимость напряжения от перемещения преобразователя:

$$E = K \cdot \Delta x, \tag{1}$$

где

E – напряжения на выходе преобразователя

K – общий коэффициент преобразования

$\Delta x$  - перемещение преобразователя

Закон Гука:

$$F = k \cdot \Delta x$$
$$\Delta x = \frac{F}{k} \tag{2}$$

Связь силы и давления:

$$F = S \cdot P, \tag{3}$$

где

S – площадь соприкосновения головки преобразователя с телом человека

P – давление

Вычисление зависимости АД от движения головки первичного преобразователя с помощью системы уравнений. Основываясь на формулах (1)-(3), составим систему уравнений (4):

$$\begin{cases} F = k \cdot \Delta x \\ F = S \cdot P \end{cases} \Leftrightarrow S \cdot P = k \cdot \Delta x \quad (4)$$
$$P = \frac{k}{S} \cdot \Delta x$$

где

$K = \frac{k}{S}$  - общий коэффициент преобразования.

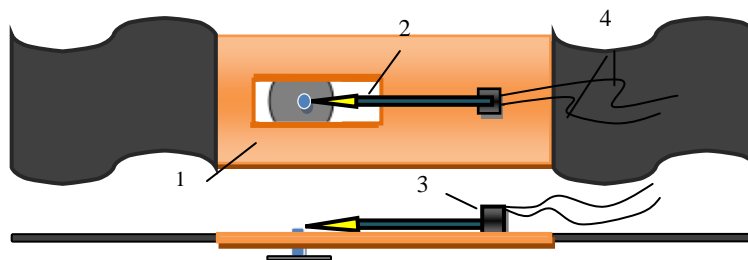


Рис. 1. Конструкция первичного преобразователя  
1 – пластина; 2 – преобразователь;  
3 – крепление; 4 – выводы.

#### 4. Структурная схема экспериментального макета:

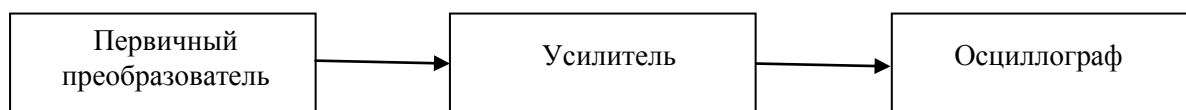


Рис. 2. Структурная схема экспериментального макета.

Данный экспериментальный макет неоднократно подвергался испытаниям на определение необходимых информативных параметров, таких как АЧХ, ФЧХ, сигнал/шум и стабильность работы в комплексе с другим оборудованием. В ходе эксперимента получили информацию о рабочей частоте и о возможности применения пьезоэлектрического преобразователя в целях измерения артериального давления.

Эксперименты подтвердили, что на представление информации влияют приборы, участвующие в опытах. Чтобы устранить эту неточность включили в эксперимент недостающее звено - фильтр низких частот третьего порядка (ФНЧ) на 10Гц. С применением ФНЧ стало возможным подавление высокой частоты, которая скрывала несущую информацию о работе преобразователя. После улучшения конструкции датчика стало возможным исследование наиболее специфических возможностей звукоснимателя (первичного преобразователя).

Труднее оценивается степень мешающего воздействия нелинейных искажений. По своему происхождению эти искажения можно разделить на две группы. К одной из них относятся искажения, возникающие из-за нелинейности преобразования. Эти искажения вызывают амплитудную модуляцию, поэтому относительно колебаний с основной частотой как на несущей возникают частоты боковых полос (комбинационные звуки). Они представляют собой относительно небольшую помеху, потому что ее значение не зависит от частоты и у современных головок звукоснимателей пренебрежимо мало.

Ко второй группе относятся искажения огибающей, возникающие вследствие геометрических различий между резцом рекордера при записи и иглой звукоснимателя при воспроизведении. Кроме гармонических составляющих, они вызывают фазовую модуляцию. Эти искажения увеличиваются пропорционально частоте, поэтому их мешающее действие чрезвычайно велико и они считаются определяющими искажениями головки звукоснимателя.

Фазовая модуляция одновременно означает и частотную модуляцию, что делает возможным определение искажений огибания на основе измерений интермодуляционных искажений. Измерительная пластинка для исследования этих искажений содержит сигналы частотой 300 и 3000 Гц. При проигрывании этой пластинки сигнал частотой 3000 Гц модулируется по фазе или частоте сигналом частотой 300 Гц. Для измерения возникающих при этом интермодуляционных искажений может быть использован фазовый дискриминатор звуковых частот, например детонетр типа ЕМТ424.

Мешающее воздействие низкочастотной модуляции, возникающей из-за колебания частоты вращения диска, может быть снижено включением простого фильтра верхних частот. Зависимости интермодуляционных искажений от прижимной силы и уровня записи очень редко приводятся в паспорте с техническими данными головки звукоснимателя.

Так как количественно определить нелинейные искажения невозможно, был проведен опыт с применением 10 гирек массой 1-10г, на пьезоэлектрический преобразователь с одинаковой скоростью подавался груз, и в ходе эксперимента было выяснено, что при подаче груза в 3г, первичный преобразователь выдает минимальные нелинейные искажения.

Одним из самых главных параметров, на которые следует обратить внимание, является прижимная сила звукоснимателя, которая не должна превышать 30 мН. Заданные в паспорте звукоснимателя минимальное и максимальное значения прижимной силы нельзя уменьшать или превышать. По возможности целесообразно установить рекомендуемое значение, так как прижимная сила влияет на вертикальный угол воспроизведения. Только при заданной изготовителем прижимной силе он будет равен 15°. Для звукоснимателей, имеющих укороченный иглодержатель, более благоприятным является больший вертикальный угол. По итогам экспериментов вертикальный угол воспроизведения у применяемого преобразователя составляет 19°.

Проведя ряд экспериментов первичного преобразователя, была разработана структурная схема макета для измерения артериального давления в основу, которой вошли блок микроконтроллера и обработка результатов в программе LabView. На рисунке 3 представлена структурная схема макета.

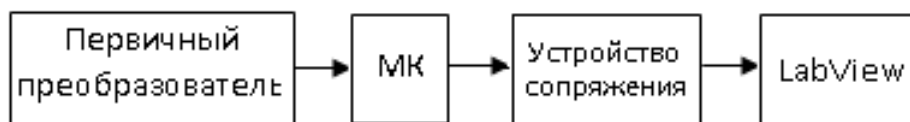


Рис. 3. Структурная схема макета.

Для анализа разрабатываемого прибора, была сформирована модель генератора, благодаря которому синусоидальный сигнал поступает на микроконтроллер, а данные обрабатываются с помощью АЦП, встроенный в АТmega16. Для микроконтроллера АТmega16 была написана программа, которая позволяет микроконтроллеру считывать информацию с пьезоэлектрического преобразователя, обрабатывать данные и выводить обработанную информацию в пакет программы LabView.

На основе проделанной работы был разработан макет устройства измерения АД с применением пьезоэлектрического преобразователя. Достоверность работы макета проводилась в сравнение с работой уже действующего прибора, основанного на осциллометрическом методе, тонометр фирмы OMRON серии M2 Basic (HEM-7116-ARU).

Для определения среднего коэффициента зависимости напряжения от артериального давления был проведен ряд экспериментов, в котором приняли участие 20 человек. Участники прошли предварительный осмотр, на котором измерили свое артериальное давление с помощью прибора Omron M2 Basic (HEM-7116-ARU). После осмотра, давление человека измерялось устройством определения артериального давления на основе пьезоэлектрического преобразователя, и производился расчет усредненного коэффициента, данные были занесены в таблицу 1.

Таблица 1. Расчет коэффициентов зависимости давления от напряжения ПП

| Ps1 | Pd1 | Ps2 | Pd2 | Us1  | Ud1  | Us2  | Ud2  | Ks1    | Kd1    | Ks2    | Kd2    | Kcp.s         | Kcp.d         |
|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|--------|--------|--------|--------|---------------|---------------|
| 133 | 81  | 120 | 75  | 2,68 | 1,63 | 2,39 | 1,59 | 49,627 | 49,693 | 50,209 | 47,170 | 49,918        | 48,432        |
| 138 | 67  | 135 | 73  | 2,78 | 1,43 | 2,76 | 1,51 | 49,640 | 46,853 | 48,913 | 48,344 | 49,277        | 47,599        |
| 103 | 69  | 93  | 60  | 2,42 | 1,53 | 2,24 | 1,34 | 42,562 | 45,098 | 41,518 | 44,776 | 42,040        | 44,937        |
| 117 | 72  | 121 | 67  | 2,39 | 1,87 | 2,47 | 1,28 | 48,954 | 38,503 | 48,988 | 52,344 | 48,971        | 45,423        |
| 124 | 69  | 121 | 71  | 2,62 | 1,69 | 2,54 | 1,38 | 47,328 | 40,828 | 47,638 | 51,449 | 47,483        | 46,139        |
| 98  | 63  | 97  | 66  | 2,43 | 1,75 | 2,27 | 1,63 | 40,329 | 36,000 | 42,731 | 40,491 | 41,530        | 38,245        |
| 137 | 76  | 135 | 68  | 2,87 | 1,53 | 2,74 | 1,67 | 47,735 | 49,673 | 49,270 | 40,719 | 48,503        | 45,196        |
| 126 | 70  | 120 | 74  | 2,83 | 1,64 | 2,42 | 1,43 | 44,523 | 42,683 | 49,587 | 51,748 | 47,055        | 47,216        |
| 123 | 62  | 115 | 61  | 2,83 | 1,54 | 2,82 | 1,67 | 43,463 | 40,260 | 40,780 | 36,527 | 42,122        | 38,393        |
| 130 | 64  | 114 | 63  | 2,59 | 1,24 | 2,28 | 1,35 | 50,193 | 51,613 | 50,000 | 46,667 | 50,097        | 49,140        |
| 109 | 70  | 104 | 60  | 2,19 | 1,2  | 2,28 | 1,45 | 49,772 | 58,333 | 45,614 | 41,379 | 47,693        | 49,856        |
| 102 | 65  | 106 | 61  | 2,24 | 1,25 | 2,42 | 1,68 | 45,536 | 52,000 | 43,802 | 36,310 | 44,669        | 44,155        |
| 144 | 85  | 136 | 71  | 2,94 | 1,91 | 2,86 | 1,56 | 48,980 | 44,503 | 47,552 | 45,513 | 48,266        | 45,008        |
| 116 | 63  | 106 | 55  | 2,47 | 1,55 | 2,34 | 1,32 | 46,964 | 40,645 | 45,299 | 41,667 | 46,131        | 41,156        |
| 114 | 76  | 106 | 71  | 2,37 | 1,37 | 2,19 | 1,74 | 48,101 | 55,474 | 48,402 | 40,805 | 48,252        | 48,140        |
| 115 | 71  | 110 | 60  | 2,32 | 1,81 | 2,32 | 1,61 | 49,569 | 39,227 | 47,414 | 37,267 | 48,491        | 38,247        |
| 128 | 69  | 119 | 64  | 2,58 | 1,21 | 2,52 | 2,11 | 49,612 | 57,025 | 47,222 | 30,332 | 48,417        | 43,678        |
| 109 | 59  | 97  | 58  | 2,47 | 1,44 | 2,36 | 1,53 | 44,130 | 40,972 | 41,102 | 37,908 | 42,616        | 39,440        |
| 129 | 65  | 120 | 68  | 2,89 | 1,59 | 2,24 | 1,57 | 44,637 | 40,881 | 53,571 | 43,312 | 49,104        | 42,096        |
| 103 | 51  | 101 | 50  | 2,39 | 1,25 | 1,82 | 1,01 | 43,096 | 40,800 | 55,495 | 49,505 | 49,295        | 45,152        |
|     |     |     |     |      |      |      |      |        |        |        |        | <b>46,996</b> | <b>44,382</b> |

где

Ps1- систолическое давление, измеренное с помощью тонометра Omron на правой руке;

Pd1 – диастолическое давление, измеренное с помощью тонометра Omron на правой руке;

Ps2- систолическое давление, измеренное с помощью тонометра Omron на левой руке;

Pd – диастолическое давление, измеренное с помощью тонометра Omron на левой руке;

Us1 – напряжение на ПП при измерении систолического давления на правой руке;

Ud1 – напряжение на ПП при измерении диастолического давления на правой руке;

Us2 – напряжение на ПП при измерении систолического давления на левой руке;

Ud1 – напряжение на ПП при измерении диастолического давления на левой руке;

Ks1 – коэффициент зависимости систолического давления от напряжения на ПП при измерении АД на правой руке;

Kd1 – коэффициент зависимости диастолического давления от напряжения на ПП при измерении АД на правой руке;

Ks1 – коэффициент зависимости систолического давления от напряжения на ПП при измерении АД на левой руке;

Kd1 – коэффициент зависимости диастолического давления от напряжения на ПП при измерении АД на левой руке.

Рис.4. Усреднение значений коэффициента зависимости систолического давления от напряжения ПП.

Эксперимент показал, что коэффициент зависимости артериального давления от напряжения на пьезоэлектрическом преобразователе составляет 45,689.

Одной из самых главных причин разработки нового медицинского оборудования является предоставление достоверной информации об артериальном давлении пациента. Для подтверждения надежной работы макета был проведен опыт, в основу которого вошли испытания, проведенные прибором с пьезоэлектрическим преобразователем, и тонометром, выполненным на основе осциллометрического метода Omron M2 Basic (HEM-7116-ARU). На основе проделанного эксперимента составили таблицу 1 и 2.

$P_{sp}$  – среднее систолическое давление, измеренное с помощью тонометра Omron на правой и левой руке;

$P_{dp}$  – среднее диастолическое давление, измеренное с помощью тонометра Omron на правой и левой руке;

$P_{sm10}$  –  $P_{sm60}$  – систолическое давление на приборе с применением пьезоэлектрического преобразователя в разное время измерения от 10 до 60 секунд.

$P_{dm10}$  –  $P_{dm60}$  – диастолическое давление на приборе с применением пьезоэлектрического преобразователя в разное время измерения от 10 до 60 секунд.

Таблица 2.1. Измерение артериального давления на протяжении 40 секунд

| $P_{sp}$ | $P_{dp}$ | $P_{sm10}$ | $P_{dm10}$ | $P_{sm20}$ | $P_{dm20}$ | $P_{sm30}$ | $P_{dm30}$ | $P_{sm40}$ | $P_{dm40}$ |
|----------|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 127      | 78       | 132,02     | 81,15      | 120,89     | 79,41      | 125,62     | 78,53      | 124,98     | 82,14      |
| 136      | 70       | 144,92     | 75,24      | 130,56     | 70,12      | 135,27     | 69,14      | 138,47     | 71,26      |
| 100      | 64       | 115,61     | 67,25      | 107,34     | 68,21      | 98,81      | 60,49      | 97,35      | 62,57      |
| 114      | 69       | 128,92     | 78,23      | 120,84     | 73,26      | 106,54     | 68,72      | 112,39     | 65,36      |
| 122      | 70       | 129,37     | 75,64      | 132,51     | 72,31      | 120,54     | 69,82      | 125,7      | 68,23      |
| 98       | 64       | 111,12     | 71,56      | 109,37     | 69,34      | 101,54     | 64,38      | 98,36      | 66,28      |
| 136      | 72       | 144,39     | 75,64      | 139,54     | 73,57      | 135,47     | 71,49      | 132,64     | 69,89      |
| 123      | 72       | 135,92     | 74,86      | 128,64     | 75,32      | 120,74     | 73,06      | 119,82     | 72,14      |
| 119      | 61       | 129,67     | 68,54      | 124,38     | 65,47      | 120,31     | 60,12      | 114,25     | 62,38      |
| 122      | 64       | 131,35     | 69,25      | 125,54     | 64,35      | 124,39     | 63,89      | 120,51     | 68,74      |
| 106      | 65       | 111,23     | 68,94      | 105,84     | 64,35      | 107,36     | 61,32      | 104,96     | 62,37      |
| 104      | 63       | 109,64     | 69,85      | 105,38     | 64,35      | 107,25     | 62,38      | 102,36     | 62,14      |
| 140      | 78       | 145,36     | 81,25      | 142,39     | 80,25      | 138,56     | 75,36      | 137,25     | 74,95      |
| 111      | 59       | 125,34     | 63,67      | 120,84     | 60,12      | 108,27     | 57,28      | 102,69     | 63,67      |
| 110      | 73       | 119,86     | 79,34      | 115,82     | 75,28      | 108,36     | 71,36      | 105,67     | 76,24      |
| 113      | 65       | 118,79     | 66,58      | 115,84     | 62,34      | 110,69     | 68,75      | 109,87     | 63,57      |
| 123      | 66       | 128,57     | 63,89      | 124,69     | 64,57      | 127,36     | 67,35      | 125,64     | 62,38      |
| 104      | 58       | 110,62     | 62,31      | 105,62     | 59,75      | 100,31     | 56,24      | 103,68     | 58,72      |
| 124      | 66       | 125,62     | 68,71      | 123,64     | 64,52      | 122,82     | 66,99      | 124,69     | 63,24      |
| 102      | 51       | 108,79     | 53,64      | 104,62     | 50,28      | 100,34     | 51,24      | 101,58     | 50,36      |

Таблица 2.2. Измерение артериального давления на протяжении 20 секунд



| Psp | Pdp | Psm50  | Pdm50 | Psm60  | Pdm60 | Psm    | Pdm   | $\gamma_s$ | $\gamma_d$ |
|-----|-----|--------|-------|--------|-------|--------|-------|------------|------------|
| 127 | 78  | 134,72 | 75,28 | 126,37 | 76,24 | 127,43 | 78,79 | -0,34      | -1,01      |
| 136 | 70  | 136,29 | 73,48 | 139,24 | 75,91 | 137,46 | 72,53 | -1,07      | -3,61      |
| 100 | 64  | 104,61 | 60,27 | 99,24  | 62,28 | 103,83 | 63,51 | -3,83      | 0,76       |
| 114 | 69  | 115,71 | 66,94 | 114,92 | 69,35 | 116,55 | 70,31 | -2,24      | -1,90      |
| 122 | 70  | 123,75 | 71,45 | 121,34 | 74,36 | 125,54 | 71,97 | -2,90      | -2,81      |
| 98  | 64  | 97,25  | 65,72 | 104,67 | 62,57 | 103,72 | 66,64 | -4,84      | -4,13      |
| 136 | 72  | 136,85 | 73,51 | 138,54 | 74,82 | 137,91 | 73,15 | -1,40      | -1,60      |
| 123 | 72  | 125,34 | 70,98 | 123,67 | 68,45 | 125,69 | 72,47 | -2,19      | -0,65      |
| 119 | 61  | 119,72 | 58,39 | 117,38 | 61,57 | 120,95 | 62,75 | -1,64      | -2,86      |
| 122 | 64  | 121,47 | 64,39 | 118,87 | 66,71 | 123,69 | 66,22 | -1,38      | -3,47      |
| 106 | 65  | 103,28 | 62,98 | 100,34 | 60,15 | 105,50 | 63,35 | 0,47       | 2,54       |
| 104 | 63  | 101,45 | 64,32 | 100,98 | 61,45 | 104,51 | 64,08 | -0,49      | -1,72      |
| 140 | 78  | 139,65 | 80,29 | 141,32 | 82,75 | 140,76 | 79,14 | -0,54      | -1,46      |
| 111 | 59  | 113,64 | 56,14 | 115,82 | 57,25 | 114,43 | 59,69 | -3,09      | -1,17      |
| 110 | 73  | 111,64 | 70,72 | 117,52 | 71,58 | 113,15 | 74,09 | -2,86      | -1,49      |
| 113 | 65  | 113,65 | 62,59 | 117,85 | 61,48 | 114,45 | 64,22 | -1,28      | 1,20       |
| 123 | 66  | 126,39 | 67,58 | 122,57 | 62,35 | 125,87 | 64,69 | -2,33      | 1,99       |
| 104 | 58  | 102,47 | 59,18 | 100,59 | 61,14 | 103,88 | 59,56 | 0,11       | -2,68      |
| 124 | 66  | 120,35 | 67,86 | 121,84 | 65,72 | 123,16 | 66,17 | 0,68       | -0,26      |
| 102 | 51  | 98,36  | 51,47 | 99,24  | 52,87 | 102,16 | 51,64 | -0,15      | -1,26      |

Физические нагрузки всегда влияли на показания тонометров, одной из основных задач создания нового прибора стало изобретение устройства для измерения артериального давления, на которое не будет влиять внешние факторы, занятия спортом и образ жизни пациента. Опыт с нагрузкой помог определить зависимость измерения АД от физических нагрузок человека, выполняемые во время определения артериального давления. Эксперимент проводился с применением тонометра OMRON и макета на основе пьезоэлектрического преобразователя. В ходе опыта человеку была дана задача в течение измерения АД: выполнять физические упражнения, а измерителю вычислить зависимость показания прибора от нагрузки. Данные эксперимента были занесены в таблицу 3.

Таблица 3. Испытание макета

| № |  | Испытуемый 1                 | Испытуемый 2                 |
|---|--|------------------------------|------------------------------|
| 1 | Пол                                    | женский                      | мужской                      |
| 2 | Возраст                                | 57                           | 24                           |
| 3 | Состояние организма                    | пониженное давление          | нормальное давление          |
| 4 | АД прибором OMRON в покое              | 115/63      114/65           | 130/74      129/70           |
| 5 | АД прибором OMRON под нагрузкой        | error      error             | error      error             |
| 6 | Измерение АД экс. макетом в покое чел. | 111,74/72,91<br>123,62/67,34 | 127,29/66,81<br>129,08/64,78 |
| 7 | Измерение АД макетом под нагрузкой     | 133,49/72,91<br>158,83/66,21 | 176,32/68,84<br>191,18/63,39 |

Эксперимент доказал, что прибор на основе осциллометрического метода не способен измерять АД в постоянном ритме человеческой жизни, т.к. все нагрузки будут влиять на достоверность работы оборудования. Устройство же измерения артериального давления с применением пьезоэлектрического преобразователя способно работать в режиме реального времени, измеряя мгновенные значения артериального давления независимо от стиля жизни пациента.

#### 5. **Выводы**

Разработано и исследовано устройство, способное измерять мгновенные значения АД с погрешностью, которая не превышает 5%. Ряд экспериментов доказали работоспособность и простоту применения устройства.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Селиванов Е. П., Халиков Р. Ш. Прибор для определения параметров артериального давления косвенным методом: Межвуз. сб. науч. тр. — Пенза: Издательство Пенз. гос. техн. ун-та, 1993. — Вып. 18. — С. 115-118.

2. Мордашкин В. К., Гусев О. Л. Малогабаритный прибор для измерения артериального давления: Межвуз. сб. науч. тр. — Пенза: Издательство Пенз. гос. техн. ун-та, 1997. — Вып. 3. — С. 22-25.

3. Селиванов Е. П., Халиков Р. Ш. Прибор для определения параметров артериального давления косвенным методом // Автоматизация процессов обработки первичной информации: Межвуз. сб. науч. тр. — Пенза: Издательство Пенз. гос. техн. ун-та, 1993. — Вып. 18. — с. 115-118.

#### **Сведения об авторах:**

**Шкляр Е.И.:** Ассистент кафедры Информационно-измерительной техники Национального исследовательского Томского политехнического университета, shklyar.e.i@mail.ru. Сфера научных интересов – медицинское приборостроение.

**Миляев Д.В.:** доцент кафедра Информационно-измерительной техники Национального исследовательского Томского политехнического университета, тел.(3822)-41-89-11, mdv@tpu.ru. Сфера научных интересов – медицинское приборостроение.

УДК 543.544:006.91

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА  
МИКРОПРИМЕСЕЙ В ЧИСТЫХ ГАЗАХ  
(DEVELOPING METHODOLOGY OF MAKING MEASURING FOR THE  
ANALYZING MICRO-ADMIXTURES IN PURE GASES)**

А.И. Насибулина, В.В. Александров\*  
A.I. Nassibulina, V.V. Alexsandrov

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
\*Карагадинский филиал Республиканского государственного предприятия  
«Казахстанский институт метрологии»  
E-mail: Nastasya3112@mail.ru

В статье рассматриваются основные моменты проведенных исследований разработки методики выполнения измерений для анализа микропримесей в чистых газах при проведении входного контроля исходного сырья и аттестации поверочных газовых смесей первого и второго разрядов газохроматографическим методом.

(In the article the main points of the research of development method for carrying out measurements for the analysis of micro-admixtures in pure gases at carrying out incoming inspection initial raw material and certification of calibration gas mixtures of first and second discharge gas chromatographic method.)

**Ключевые слова:**

Методика выполнения измерений, чистые газы, поверочные газовые смеси, газовая хроматография.

(Methodology of making measuring, pure gases, calibration gas mixtures, gas chromatography.)

Газоаналитические измерения играют важную роль во всех областях национальной экономики и социальной сфере жизнедеятельности человека. Получаемая информация широко используется в здравоохранении, экологической безопасности, в газо – и горнодобывающей промышленности, кислородной промышленности, нефтехимии и химической промышленности, энергетике и металлургической промышленности, угольной промышленности, оборонной промышленности, электронике, геохимии и климатологии и др.

Для измерения содержания компонентов в газовых средах (воздухе рабочей зоны, технологических газовых средах, выхлопных газах автомобильного транспорта, отходящих газах предприятий цветной металлургии и пр.) применяются различные типы газоанализаторов (хроматографы, сигнализаторы горючих газов, газоанализаторы различных типов). Так, на сегодняшний день парк приборов газового анализа в Республике Казахстан составляет более 10 000 ед. Для их своевременной поверки, градуировки и калибровки применяются рабочие эталоны 1-го и 2-го разрядов – стандартные образцы состава газовых смесей – выпускаемые под техническим названием поверочные газовые смеси (далее ПГС). В связи с этим достоверность и точность получаемой газоаналитической информации будет напрямую зависеть от точности используемых поверочных газовых смесей.

В соответствии с СТ РК 2.118 «Государственная поверочная схема для средств измерений компонентов в газовых средах» передача размера единицы молярной доли поверочным газовым смесям 1-го разряда осуществляется от поверочных газовых смесей 0-го разряда. При этом, одним из наиболее значимых факторов, определяющих точность ПГС 0-го разряда, является достоверно и точно установленное содержание примесей в исходных чистых газах, полученное при осуществлении входного контроля. В соответствии с требованиями нормативной базы Республики Казахстан входной контроль должен производиться на основе стандартизованных и метрологически аттестованных методик выполнения измерений.

Таким образом, целью исследования стала разработка методики выполнения измерений (далее МВИ) для определения примесей в чистых газах, и предназначенной как для аттестации чистых газов используемых в производстве ПГС 0-го разряда, так и для передачи размера

единицы объемной доли поверочным газовым смесям 1-го разряда в диапазоне микроконцентраций компонентов.

В связи с этим были поставлены следующие задачи:

- а) провести анализ производства поверочных газовых смесей и сформировать основные требования к выбору метода проведения измерений;
- б) на основе требований провести выбор метода измерений, средства измерений и методы обработки полученных данных;
- в) разработать требования к методике выполнения измерений в соответствии с требованиями стандарта СТ РК 2.18;
- г) подготовить программу проведения экспериментальных исследований характеристик методики выполнения измерений;
- д) разработать методику выполнения измерений и провести метрологические исследования для аттестации методики в соответствии со стандартом СТ РК 2.18.

Исследования в области газоаналитических измерений в Республики Казахстан охватывают сравнительно короткий этап. За этот время в Республике Казахстан развита нормативная и эталонная база газоаналитических измерений (СТ РК 2.118, СТ РК 2.10, СТ РК 2.180). На базе исследования и внедрения государственного эталона единицы молярной доли компонентов в газовых средах с 2010 г. на базе Карагандинского филиала РГП «КазИнМетр» организовано серийное производство поверочных газовых смесей.

Анализ производства поверочных газовых смесей основывался на рассмотрении трех взаимосвязанных аспектах: технического, технологического и метрологического обеспечения (рисунок 1). В соответствии с рисунком 1 выходной продукцией производства являются стандартные образцы состава газовой смеси (СОС ГС), которые представляют собой двухкомпонентные, трехкомпонентные и многокомпонентные смеси газов, выпускаемые трех разрядов: нулевого, первого и второго разрядов.

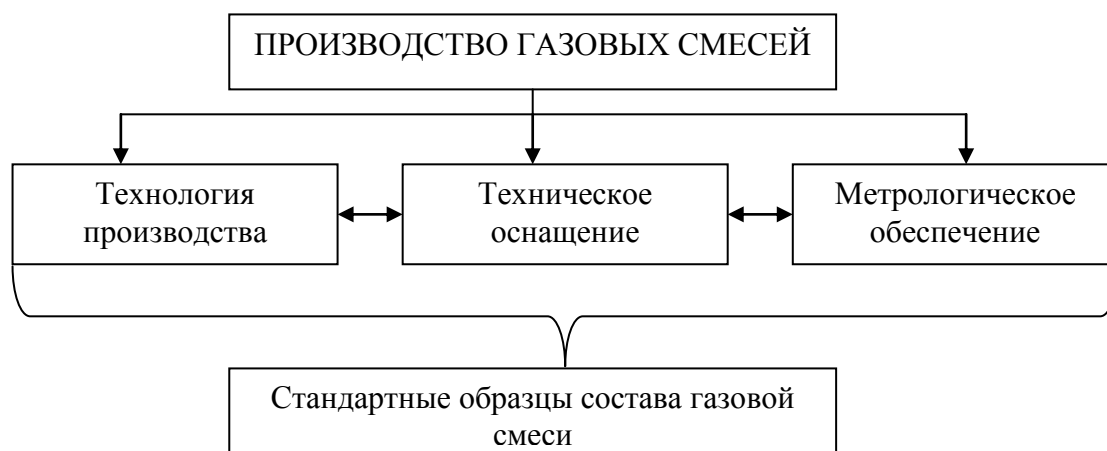
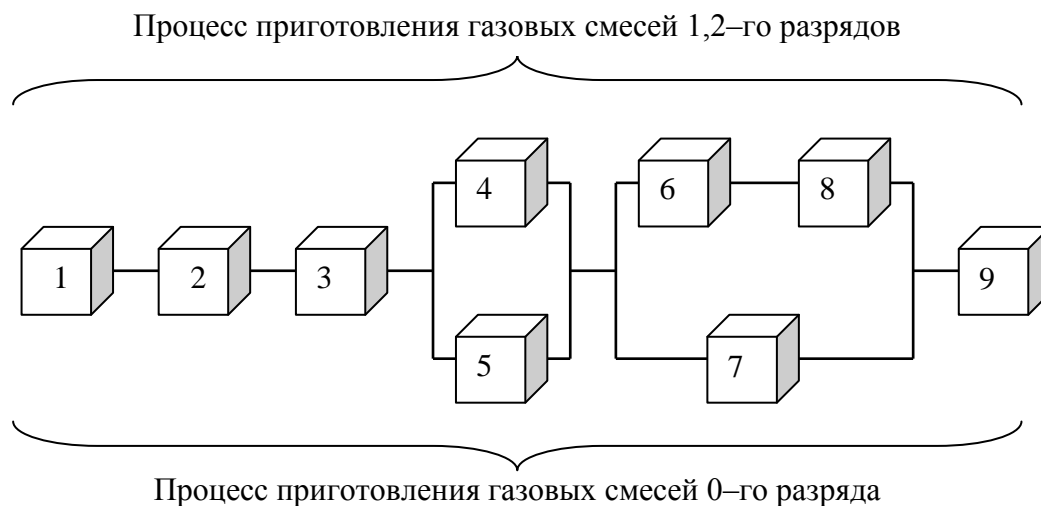


Рис. 1. Структура производства газовых смесей

Технологически, в основе производства газовых смесей первого и второго разряда лежит смешивание исходных газов в заданном соотношении методом парциальных давлений (манометрическим) на газосмесительной установке ГСУ-10 и их аттестацией в сравнении с газовыми смесями нулевого разряда. Производство газовых смесей нулевого разряда проводится гравиметрическим методом приготовления на газосмесительном гравиметрическом комплексе, с последующей их аттестацией по расчетной процедуре в соответствии со стандартом ИСО 6142 и СТ РК 2.10.

Модель обобщенной технологической схемы приготовления (рисунок 2) доказывает, что первичным и немаловажным этапом является проведение входного контроля исходных газов, при этом согласно анализу нормативной документации данное требование определяется технологическим регламентом приготовления газовых смесей производства ПГС и требованиями гравиметрического метода дозирования.



1 – подготовка баллонов;  
2 – аналитический контроль исходных газов;  
3 – расчет параметров дозирования;  
4 – дозирование при контролируемом давлении;

5 – измерение массы дозируемых газов;  
6 – гомогенизация смеси;  
7 – расчет содержания целевого компонента в смеси;  
8 – анализ смеси;  
9 – аттестация.

Рис. 2. Схемы процессов приготовления.

Рассмотрение метрологического аспекта производства ПГС показало, что предельно достижимая точность, которая может быть получена с помощью гравиметрического метода, будет в большой степени зависеть от чистоты исходных газов, используемых для приготовления газовой смеси. В соответствии с ИСО 6142 «...примеси в исходных газах часто формируют один из самых существенных вкладов в неопределенность состава окончательной смеси. Вклады в неопределенность зависят от количества примесей в чистых исходных газах и от точности, с которой было измерено содержание этих примесей...».

Анализ технических требований к содержанию фоновых примесей в исходных материалах показал необходимость проведения входного контроля на уровне 0,0001 до 0,1 %. К примесным компонентам, присутствующим в чистых газах, относятся водород, гелий, аргон, азот, кислород, оксид углерода, диоксид углерода и метан, что определяет требования к диапазону измерений методики и определяемым компонентам.

Исследования выходной продукции производства ПГС на основе анализа потребности предприятий в ПГС показал, что географически, каждый регион Республики Казахстан включает, по меньшей мере, два крупных предприятия, использующих в своем производстве приборы аналитического контроля и ПГС. Исследования сфер деятельности каждого предприятия и область применения востребованных предприятием ПГС, а также соотношение типов ПГС, охваченных номенклатурой выпускаемой продукции, позволил выделить и обобщить следующие области (рисунок 4):

- а) газо- и нефтепереработка – номенклатурой охвачено 68%;
- б) энергетика и металлургия – номенклатурой охвачено 64%;
- в) оборонная промышленность, основу которой составляет Министерство чрезвычайных ситуаций Республики Казахстан (МЧС РК) - номенклатурой охвачено 43% (основную долю запрашиваемых типов газовых смесей составляют многокомпонентные газовые смеси и бинарные газовые смеси с концентрацией менее 0,1%);
- г) угольная промышленность - номенклатурой охвачено 63%;
- д) приборостроение и стандартизация, одной из сфер деятельности которых является поверка приборов и систем аналитического контроля, использующихся, как на данных предприятиях, так и в геохимии и климатологии, медицине, здравоохранении, экологии, химической промышленности, в вопросах охраны окружающей среды, санитарного контроля, и в других сферах - номенклатурой охвачено 59%.

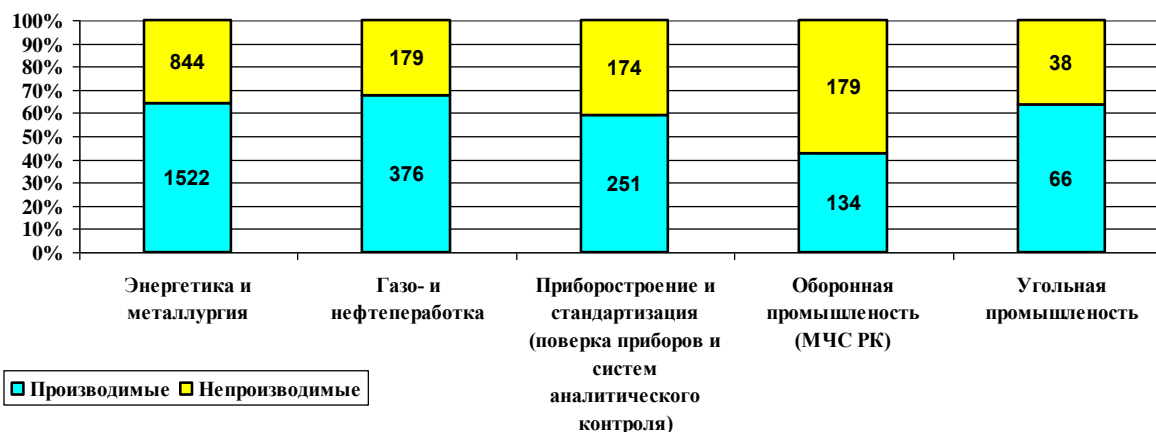


Рис. 4. Потребность в ПГС отраслей промышленности.

Анализ потребности предприятий в ПГС на основе заявок, поступивших от потребителей в период с 2010 по 2011 год, показал востребованность в газовых смесях на основе метана, водорода, аргона, окиси углерода в диапазоне менее 0,1%, при это суммарная потребность в данных типах смесей составила 24% (рисунок 5) от общей потребности составляющей приблизительно 4 тысячи экземпляров в год (рисунок 6).

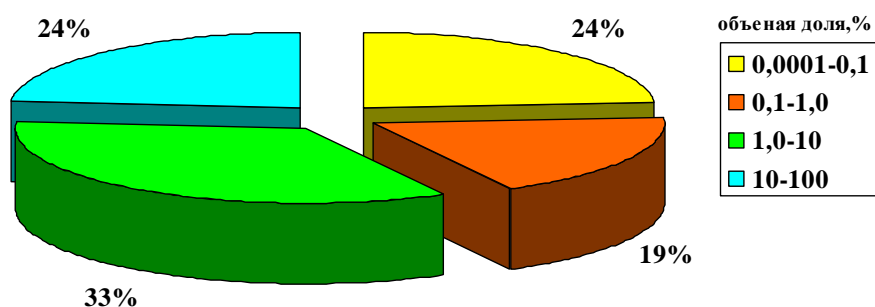


Рис. 5. Процентное соотношение запрашиваемой продукции ПГС в различных диапазонах.

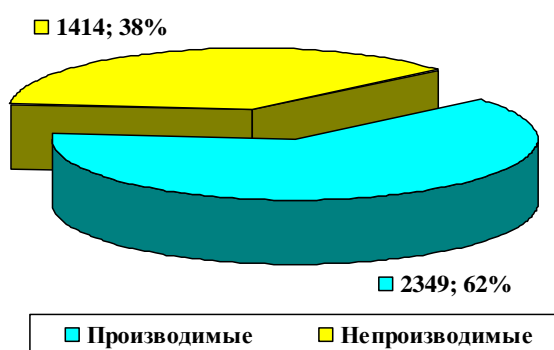


Рис. 6. Процентное соотношение выпускаемой продукции.

Таким образом, доказывается универсальность МВИ, которая позволяет не только производить входной контроль исходного материала и проводить аттестацию и разработку новых типов ПГС 1 и 2 разрядов.

Анализ методов определения микропримесей в газовых средах показал, что газохроматографический метод соответствует всем необходимым требованиям реализации МВИ. Особенности метода выявляются в:

а) высокой разделительной способности: возможность анализа многокомпонентных смесей, состоящих до сотен компонентов;

б) высокой чувствительности: возможности детекторов позволяют определять концентрации до  $10^{-10}$  %;

в) экспрессности метода, так как анализ многокомпонентных смесей, состоящих из несколько десятков или сотен компонентов, производится за 1–1,5 часа;

г) высокая точность анализа: погрешность измерений  $\pm 5\%$  относительных легко достигается практически на любой газохроматографической аппаратуре. В условиях лаборатории возможно производить измерения с погрешностью  $\pm 0,001$ – $0,002$  % относительных.

Аппаратно и программно газохроматографический метод реализуется с помощью хроматографа «Хроматэк – Кристалл 5000.2» и его программного обеспечения «Хроматэк Аналитик».

На основе общих требований стандарта СТ РК 2.18:

а) разработано техническое задание на разработку МВИ объемной доли азота, аргона, водорода, кислорода, гелия, оксида углерода, диоксида углерода, метана при проведении входного контроля и аттестации ПГС первого и второго разрядов,

б) разработана программа экспериментального определения характеристик погрешности и ее составляющих при разработке МВИ, согласно которой были определены состав, содержание и сроки проведения работы.

В ходе экспериментальных исследований наблюдения проводились в 10 лабораториях (в условиях внутрилабораторной прецизионности) по 6 единичным измерениям. Оценка показателей качества МВИ проводилась с помощью набора ОО в виде АС, приготовленных гравиметрическим методом для каждого диапазона. Погрешность ОО оценена по расчетной процедуре в соответствии с требованиями ИСО 6142. В диапазонах от 0,0001 до 0,001% включительно и от 0,001 до 0,01% включительно выбрано по две контрольных точки в начале и в конце диапазонов, для диапазона от 0,001 до 0,1% включительно в связи со стабильностью показаний по одной в конце диапазона. Определение точности МВИ проводилось с соответствием с РМГ 61.

Отдельно проведены исследования по подбору условий проведения измерений на хроматографе «Хроматэк – Кристалл 5000.2». При выборе условий оптимизировались следующие параметры: выбор колонки; температура термостата; тип и скорость газа-носителя; температура детекторов.

Условия подбирались таким образом, что бы было достигнуто полное разделение хроматографических пиков и предел детектирования был не более 1 ppm.

При выборе условий проведения измерений на хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.2» была использована многокомпонентная газовая смесь, содержащая кислород, водород, гелий, аргон, метан, окись углерода, диоксид углерода в азоте. Объемная доля компонентов 0,1 %.

Конструктивно хроматограф представляет трех канальную систему. Канал 1 позволяет произвести детектирование азота, гелия, водорода (при использовании детектора по теплопроводности (далее ДТП)), кислорода, водорода (при использовании термохимического детектора (далее ДТХ)). При этом чувствительность ДТП–2 по гелию составила 1 ppm, водороду 1 ppm, кислороду 20 ppm (рисунок 7). Использование ДТХ при анализе кислорода позволило повысить чувствительность по кислороду до 1 ppm (рисунок 8).

Применение в качестве газа-носителя гелия для анализа многокомпонентной смеси на канале 2 позволило повысить чувствительность ДТП–1 по аргону на 1 ppm (рисунок 9).

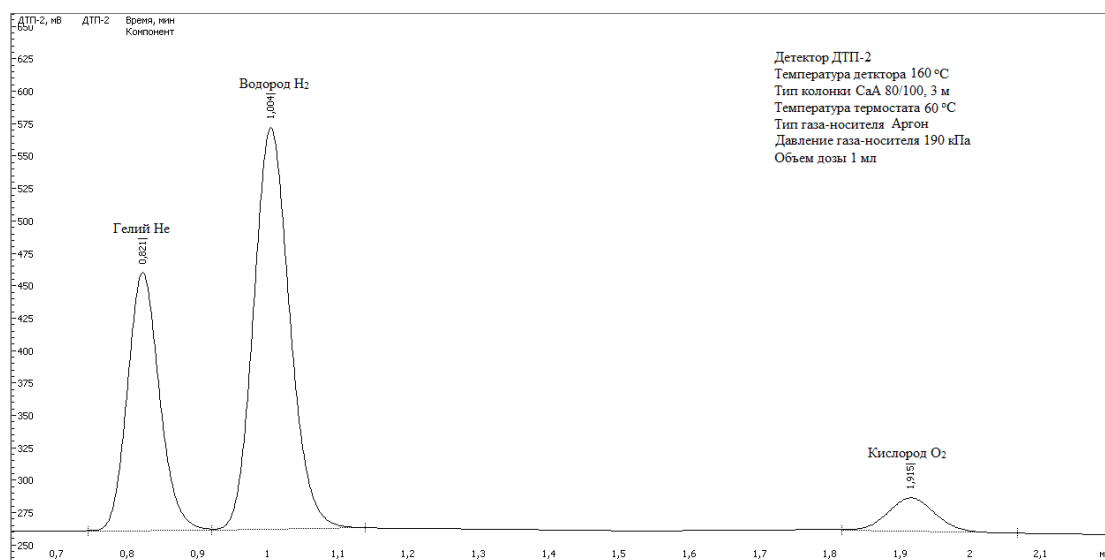


Рис. 7. Хроматограмма анализа многокомпонентной смеси на детекторе ДТП-2 по каналу.  
1

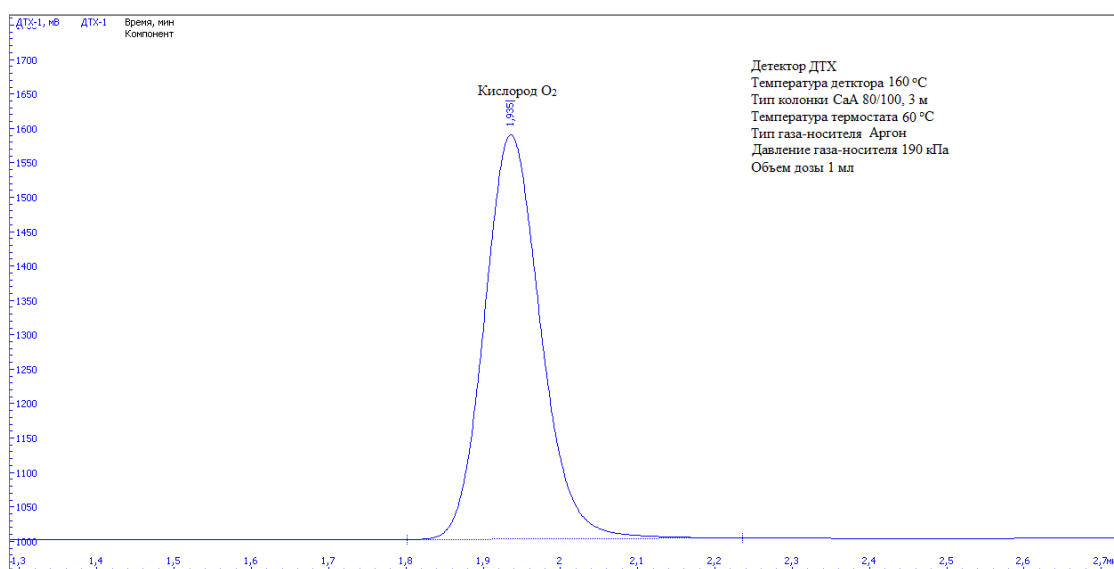


Рис. 8. Хроматограмма анализа многокомпонентной смеси  
на детекторе ДТХ-1 по каналу 1.

Использование детектора ПИД позволило определить оксид углерода, диоксид углерода и метан с порогом чувствительности 0,1 ppm (рисунок 10). Для конвертирования оксида углерода и диоксида углерода в метан после выхода из хроматографической колонки Garboxen 1000 80/100 применяли метанатор.



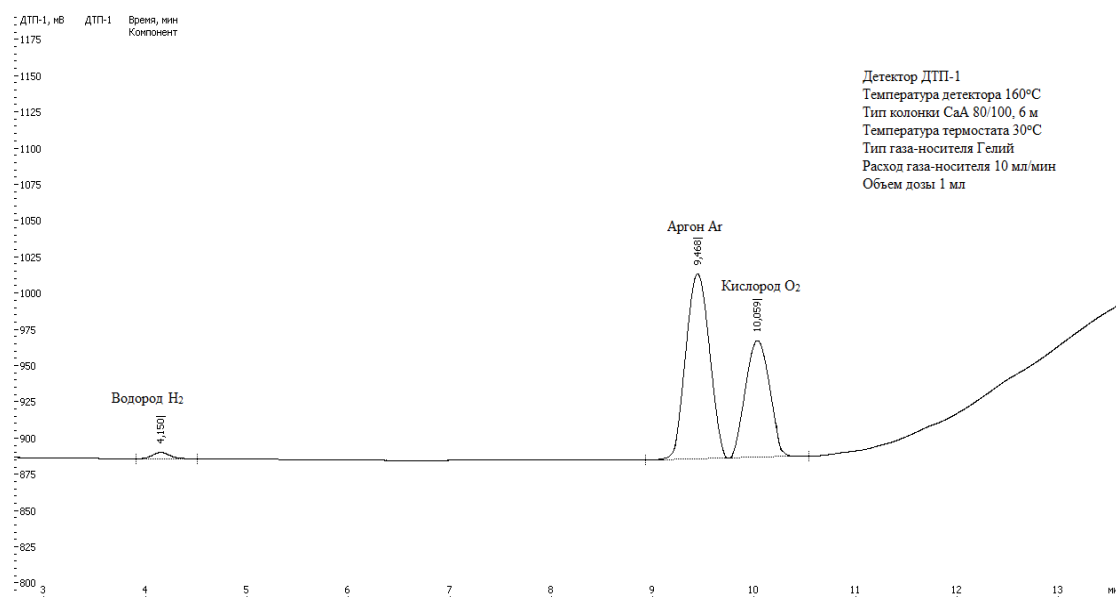


Рис. 9. Хроматограмма анализа многокомпонентной смеси на детекторе ДТП-1 по каналу 2.

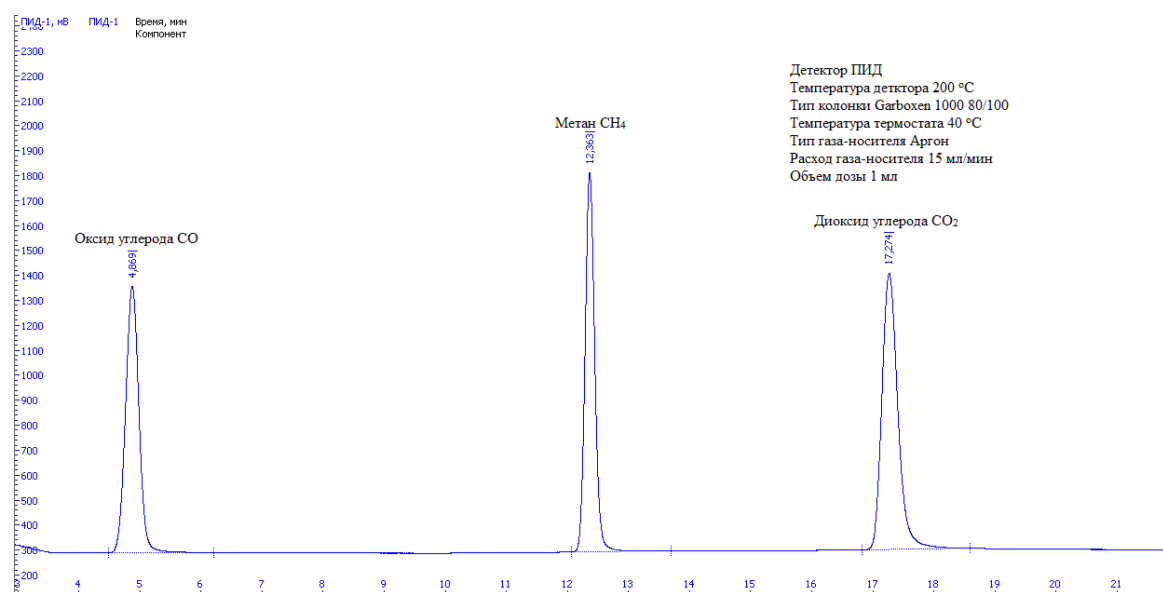


Рис. 10. Хроматограмма анализа многокомпонентной смеси на детекторе ПИД-1 по каналу 3.

Условия приемлемы при проведении анализа чистых газов. Однако при анализе аргона в кислороде и гелия в водороде происходит наложение пиков, поэтому результатом анализа является суммарный пик аргон + кислород и гелий + водород соответственно.

По результатам экспериментальных исследований и обработки статистических данных установлено, что метрологические характеристики МВИ не превышают показателей точности указанных в таблице 1.

Таблица 1. Показатели точности (правильность и прецизионность) МВИ

| Объемная доля, %        | Показатель повторяемости, $\sigma_r$ , % | Показатель внутрिलाбораторной прецизионности, $\sigma_{Rl}$ , % | Показатель правильности, $\sigma_{Cl}$ , % | Показатель точности, $\pm \delta_{Rl}$ , % |
|-------------------------|--|---|--|--|
| от 0,0001 до 0,001 вкл. | 0,5                                      | 1,0   | 2,0  | 2,5  |
| от 0,001 до 0,01 вкл.   | 0,3                                      | 0,8   | 1,5  | 2,0  |
| от 0,001 до 0,1 вкл.    | 0,2                                      | 0,5   | 1,0  | 1,5  |

На основании полученных данных была разработана методика выполнения измерений «Газовые смеси. Определение объемной доли азота, водорода, кислорода, оксида углерода, диоксида углерода, аргона, гелия, метана газохроматографическим методом», которая используется на предприятии для решения следующих задач:

- входной контроль чистых газов, используемых для изготовления эталонных газовых смесей и поверочных газовых смесей 0-го разряда на гравиметрическом комплексе, входящем в состав эталона единицы молярной доли компонентов в газовых средах в целях совершенствования гравиметрического метода;

- аттестация поверочных газовых смесей 1-го и 2-го разрядов на основе водорода, гелия, кислорода, аргона, метана, окиси углерода, диоксида углерода в диапазоне объемной доли от 0,0001 % до 0,1 %.

- разработка новых типов ПГС на основе водорода, гелия, кислорода, аргона, метана, окиси углерода, диоксида углерода в диапазоне объемной доли от 0,0001 % до 0,1 %.

Совокупность результатов содержат решение современных задач метрологического обеспечения производства поверочных газовых смесей в Республики Казахстан.

Работа прошла апробацию на секторе по производству поверочных газовых смесей Карагандинского филиала Республиканского государственного предприятия «Казахстанский институт метрологии» и зарегистрирована в реестре ГСИ РК (Свидетельство №597 о метрологической аттестации методики выполнения измерений).

**Сведения об авторах:**

**Насибулина А.И.:** магистрант Национального исследовательского Томского политехнического университета, сфера научных интересов – измерения в науке и технике, исследователь в области метрологии.

**Александров В.В.:** заведующий сектором производства поверочных газовых смесей Карагандинского филиала Республиканского государственного предприятия «Казахстанский институт метрологии», сфера научных интересов – метрология.

УДК 621.382

**ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПОЛОГИИ АНТЕНН КВЧ ДИАПАЗОНА ДЛЯ АВТОДИННЫХ  
КВЧ ДАТЧИКОВ  
(TOPOLOGY OPTIMIZATION OF ACTIVE MICROSTRIP ANTENNAS FOR  
SELF-HETERODYNE SENSORS OF EHF RANGE)**

В.И. Юрченко, А.П. Люлякин, А.А. Трубачев  
(V.I. Yurchenko, A.P. Lyulyakin, A.A. Trubachev)

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

avaponchoavaponcho@gmail.com

Приводятся результаты теоретического исследования и численного моделирования антенн КВЧ диапазона в качестве активных антенн для датчиков КВЧ диапазона на слаботочных диодах Ганна.

(There are results of theoretical research and simulation of EHF range antennas like active antennas for EHF range sensors with low-power Gunn diodes.)

**Ключевые слова:** микрополосковые антенны, автодинные системы, КВЧ датчики  
**(Key words:** microstrip antennas, self-heterodyne systems, EHF sensors)

Автодинный генератор представляет собой открытую автоколебательную систему, использующую специфический автодинный эффект - явление изменения параметров автоколебаний под воздействием стороннего или собственного отраженного излучения. Автодинные датчики КВЧ диапазона на слаботочных диодах Ганна находят широкое применения в различных устройствах.

Одновременное использование диодов Ганна в функциях передатчика и преобразователя с усилением полезного сигнала, отраженного от объекта, позволяет упростить схемное и конструктивное исполнение устройств ближней радиолокации. При создании конкретных элементов автодинов и устройств на их основе в целом требуется учитывать радиофизические аспекты распространения, отражения и приема КВЧ излучения.

Функции приема и передачи сигнала системой подразумевают наличие антенны, оптимизации топологии которой и посвящена данная работа. Задача состоит в выборе наиболее оптимальной геометрии антенны для улучшения ее характеристик. В дальнейшем такая антенна должна стать элементом матрицы датчиков на автодинных генераторах, используемой в портативном ручном радиосканере или какой либо иной системе досмотра; каждая антенна независима друг от друга, нагружена на собственный генератор.

Исходя из такого технического задания антенна должна обладать полосой частот в пределах одного ГГц, узкой диаграммой направленности, высоким коэффициентом направленного действия, и при этом обладать минимальными габаритами.

Для данного диапазона частот наиболее подходящими являются апертурные антенны. Но исходя из последних данных института инженеров электротехники и электроники (ИЭЭ), секции Антенны и распространение радиоволн (Antennas and Propagation), в миллиметровом диапазоне длин волн активно ведется освоение микрополосковых антенн различного вида. Хотя и антеннами, обладающими наиболее узким лучом, являются, опять же, апертурные, но их размеры, по сравнению с остальными, слишком велики. Проанализировав все вышеперечисленные пункты, было предпринято остановить свой выбор на микрополосковой антенне. Так же в пользу этого решения выступали такие факторы как относительная простота изготовления, достаточно небольшими потерями, высокая интеграция микрополосковой части с активным элементом и невысокая стоимость.

Элемент матрицы, один датчик, представляет собой активную микрополосковую антенну, нанесенную на подложку из кварца и схему регистрации автодинного отклика. Диод Ганна имеет два варианта включения в схему: при несимметричном включении он монтируется в антенну таким образом, что один из контактов припаен непосредственно к проводнику, а второй к заземляющему экрану, который является также теплоотводом. Такая конструкция является еще одним шагом к миниатюризации и уменьшению затрат на производство датчиков.

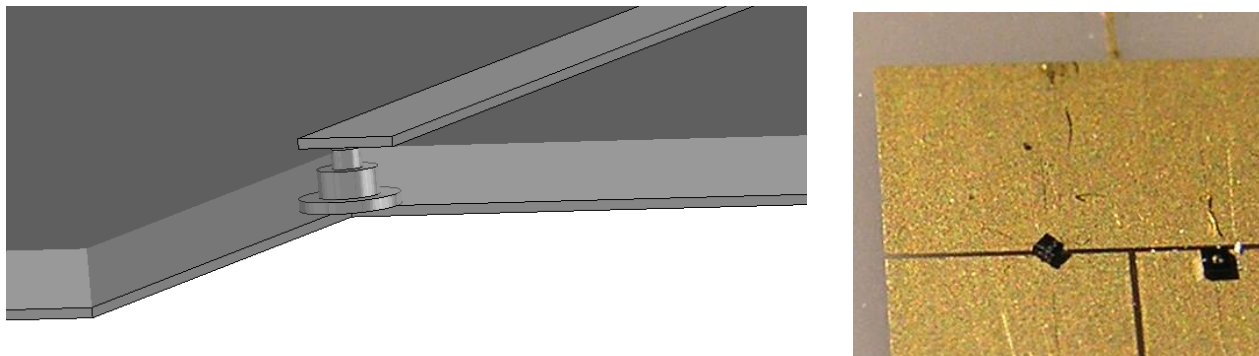


Рис. 2. Два варианта включения диода Ганна: несимметричное и симметричное, соответственно

Из всего многообразия форм, предоставляемых микрополосковыми антеннами, были выбраны для численного моделирования три варианта исполнения антенны: прямоугольная патч-антенна, решетка из четырех прямоугольных антенн и треугольная двухплечевая антенна. Моделирование проводилось на программном продукте CST Microwave Studio. Ниже представлены результаты моделирования антенн.

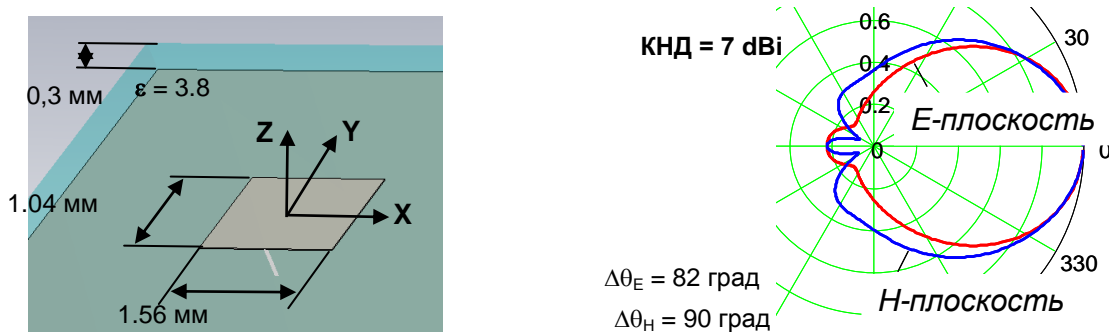


Рис. 2. Геометрия прямоугольной микрополосковой антенны и ее диаграмма направленности.

Прямоугольная патч-антенна представляет собой Прямоугольный полупроводник, нанесенный на диэлектрик, рассчитан так чтобы соотношение сторон составляло 3/2. Такое соотношение возбуждает в проводнике моду  $TM_{01}$ .

Наряду с одиночными излучателями широкое применение получили печатные антенные решетки. Моделирование простейшей 4х элементной печатной антенной решетки из излучателей резонаторного типа показало, что при увеличении количества элементов, значительно улучшаются характеристики антенны. Так, коэффициент направленного действия антенны увеличился до 17.2 dBi, а ширина главного лепестка на диаграмме направленности в E- плоскости уменьшился до 19 град. Безусловно весомым минусом является тот факт, что габариты датчика значительно увеличиваются.

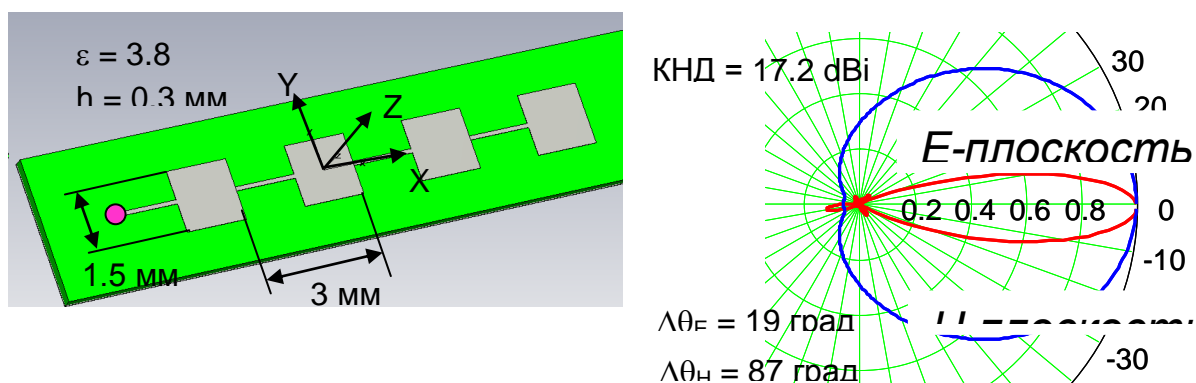


Рис. 3. Геометрия прямоугольной 4х элементной микрополосковой антенны и ее диаграмма направленности.

Треугольная двухплечевая микрополосковая антенна представляет собой два треугольника, обращенные друг к другу вершинами и возбуждаемые в центре между ними. Что в свою очередь является симметричным вибратором, который часто используются в миллиметровом диапазоне длин волн.

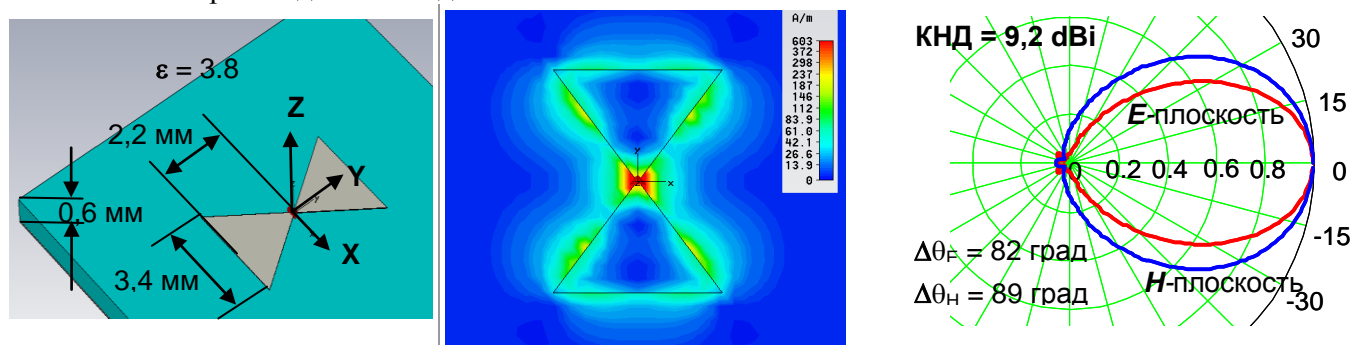


Рис. 4. Геометрия треугольной двухплечевой антенны, распределение магнитного поля на ее поверхности ( $f=42$  ГГц), диаграмма направленности антенны

Моделирование двухэлементной патч-антенны с треугольными плечами при симметричном возбуждении показало, что размеры антенны с модой  $TM_{11}$  в диапазоне 35-50 ГГц наилучшим образом подходят для монтажа бескорпусных диодов Ганна, антенна имеет линейную поляризацию и коэффициент направленного действия не менее 9 дБ. Поиск микрополосковой антенны для автодинного датчика было предложено остановить на ней.

Следующим логичным шагом будет изучение взаимного влияния элементов в матрице. Необходимо выяснить как поле, переотраженное от соседних элементов, влияет на излучение антенны, в том числе и на диаграмму направленности и на другие характеристики. Рассмотрение матрицы а не решетки, где необходима синхронизация датчиков (а каким образом она должна быть проведена, и вообще возможность такого шага, в литературе найдено не было), дает нам право рассматривать каждый элемент отдельно: как уже было ранее сказано, антенны в данной структуре независимы друг от друга, и каждая нагружена на свой собственный генератор. Все датчики опрашиваются в различные отрезки времени и имеют при этом различную частоту. Возникает возможность при достаточной узкополосности опрашивать одновременно большее количество датчиков.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юрченко А.В., Юрченко В.И., Воторопин С.Д.//Автодинные датчики в измерительной технике: монография /; Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 128 с.
2. Воторопин С. Д., Юрченко В. И. Автодины//Электронная промышленность. – 1998. – вып. 1-2. – С. 110-115.
3. С.Д. Воторопин, В.Я. Носков//Внешнее детектирование автодинного сигнала в КВЧ генераторах на полупроводниковых диодах. Радиоэлектроника. – М.: Вып. 4, 2001 г.
4. Воторопин С.Д. //V-я Международная конференция АПЭП-2000. Сборник докладов. – Новосибирск. – 26-29 сентября 2000. – С. 114-116.
5. Воскресенский Д.И. Устройства СВЧ и антенны. Изд. 2-е, доп. и перераб. – М.: Радиотехника, 2006. – 376 с

#### **Сведения об авторах:**

Юрченко Василий Иванович, заместитель заместителя генерального директора ОАО НИИПП по научной работе;

Люлякин Андрей Петрович, магистрант первого года Томского государственного университета Радиофизического факультета кафедры Радиофизики.

Трубачев Анатолий Андреевич, аспирант ТУСУР, младший научный сотрудник;

УДК 621.386.84

## СПОСОБЫ МАРКИРОВКИ РЕНТГЕНОВСКИХ СНИМКОВ (METHODS OF X-RAY IMAGES MARKING)

М.К. Ковалев

Научный руководитель: Ю.В. Алхимов

M. Kovalev

Research advisor: Y. Alkhimov

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: kovalev@tpu.ru

Из всего многообразия методов неразрушающего контроля, радиография является одним из самых широко распространенных, а рентгеновская пленка остается основным детектором ионизирующего излучения.

На каждом радиографическом снимке должна быть изображена четко видимая маркировка, чаще всего, содержащая большой объем информации. Существующие методы маркировки имеют множество недостатков, поэтому поиск новых способов маркировки является актуальной задачей.

В данной статье описывается специальное маркирующее устройство, содержащее источник света, при помощи которого на участок снимка проэкспонированного ионизирующим излучением будет наложено световое изображение в виде информации, нанесенной на лист бумаги.

(Among of all variety of the methods of nondestructive testing radiography is the widespread method. The radiographic film is one of the main detector of the ion emission.

The described marking contained a huge volume of information should be depicted on the radiographic film. The existing methods of marking have a lot of disadvantages. Currently the search of new ways of marking is actual. The objective of the article is to describe the special marking device contained the light source. The light image in the form of the information put on the sheet of paper and exposed by the ion radiation by means of the light.)

### **Ключевые слова:**

Неразрушающий контроль, радиография, рентгеновская пленка, маркировка, свинцовые знаки.  
(Not destroying testing, radiography, x-ray film, marking, lead signs.)

### **Введение**

Неразрушающий контроль (НК) — контроль надежности и основных рабочих свойств и параметров объекта или отдельных его элементов (узлов), не требующий выведение объекта из работы либо его демонтажа.

Одним из самых широко распространенных методов контроля является радиография. Этот метод основан на получении статического видимого изображения внутренней структуры изделия, просвечиваемого ионизирующим излучением. Так до недавних пор контроль сварных соединений трубопроводов был целиком областью применения радиографии, и только недавно появившиеся автоматические системы ультразвукового контроля (УЗК) обоснованно стали эффективной альтернативой радиографии. Но на практике радиографический метод наиболее широко распространен в связи с его простотой и возможностью документального подтверждения полученных результатов. Рентгеновская пленка, на сегодняшний день, является основным детектором ионизирующего излучения. [1]

### **Способы маркировки**

Согласно ВСН 2-148-82, на каждом радиографическом снимке должна быть изображена четко видимая маркировка, получаемая путем установки под кассету перед просвечиванием стыка определенной системы свинцовых маркировочных знаков (цифр, букв, стрелок), набор маркировочных знаков изображен на рисунке 1. [2]

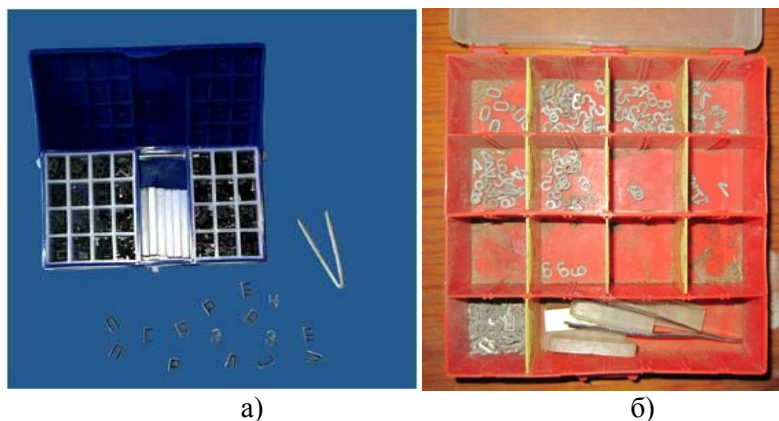


Рис.1. Наборы свинцовых маркировочных знаков  
а) новый набор; б) эксплуатируемый набор.

Каждому дефектоскописту полевой испытательной лаборатории (ПИЛ), специализированного или хозрасчетного участка и других подразделений (при иных формах организации службы контроля) приказом по организации, в которой он работает, присваивают шифр, который должен быть зафиксирован на радиографических снимках просвеченных им стыков.

Помимо этого на пленку наносится следующая информация:

- дата сварки (число, месяц, год - последние две цифры года);
- шифр (клеймо) сварщика или бригады;
- номер пленки;
- номер стыка.

Существует 8 наборов маркировочных знаков, их следует подготавливать до начала просвечивания непосредственно в помещении лаборатории, для чего необходимо предварительно иметь сведения о намечаемых к контролю стыках: их номера, даты сварки и клейма сварщиков или бригад, выполнявших сварку данных стыков. Необходимую систему цифр и букв выкладывают на гибкой подложке (например, на небольших отрезках рентгенографической пленки со снятым предварительно эмульсионным слоем и т.п.) и заклеивают прозрачной клейкой лентой. [3]

Номера стыков набирают непосредственно на месте производства работ по контролю путем укладки соответствующих свинцовых цифр в пеналы или между двумя слоями пластыря или клейкой ленты, как изображено на рисунке 2. Предварительно в пеналы должны быть вложены цифры, указывающие номер соответствующей пленки. Номера стыков добавляются к ним на месте контроля.



Рис.2. Укладка свинцовых знаков в пеналы и на пластырь.

Маркировка рентгеновских снимков при помощи свинцовых маркировочных знаков достаточно трудоемка, особенно учитывая полевые условия проведения контроля. Так же



возможна ситуация порчи снимка, ввиду попадания маркировочных знаков на контролируруемую область, как изображено на рисунке 3.

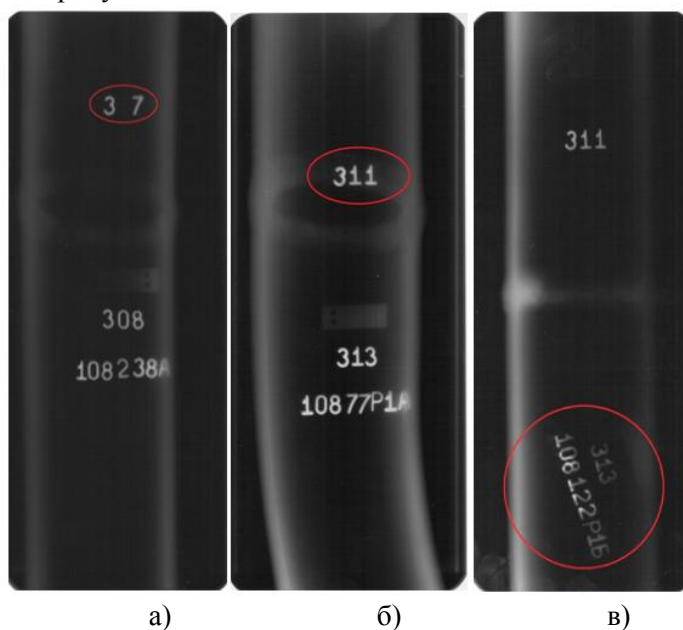


Рис.3. Типичные случаи негодных снимков а) выпадение цифры; б) попадание наборки на контролируемую область; в) отклеивание наборки.

Согласно ОСТ 102-51-85 возможна маркировка простым карандашом, проставляемая после проявления проэкспонированных пленок. [4] Вместо карандашей возможно использование специальных перманентных промышленных маркеров, рисунок 4. Непрозрачные лаковые чернила позволяют делать хорошо заметные надписи густым плотным слоем на темных поверхностях. За несколько секунд наносится нестираемая, быстро сохнущая надпись с информацией о параметрах экспозиции.



Рис.4. Перманентный промышленный маркер.

Однако применение подобных маркеров не всегда возможно, так как информация, нанесенная ими, может быть изменена либо просто стерта, как показано на рисунке 5.



Рис.5. Размазанная маркировка.

Таким образом, разработка более совершенного способа маркировки рентгеновских снимков является весьма актуальной. Необходим способ маркировки, позволяющий наносить

на пленки легко считываемую информацию, которая не может быть подвергнута исправлению или удалению. Процесс маркировки должен быть не трудоемким, по возможности автоматизированным.

### Маркирующее устройство

Маркировка рентгеновской пленки может быть реализована, помимо классических способов, при помощи засвечивания участка проэкспонированной пленки перед ее проявлением. На засвечиваемый участок необходимо прикладывать листок бумаги с необходимой информацией в негативе. Подобную процедуру можно произвести, используя специальное маркирующее устройство, содержащее источник света, при помощи которого на участок снимка проэкспонированного ионизирующим излучением будет наложено световое изображение в виде информации, нанесенной на лист бумаги.

Нами был разработан прототип устройства, изображенного на рисунке 6, которое позволяет наносить маркировку размером 25x80 мм. Для засветки участка пленки используется лампа мощностью 15 Вт. Засветка производится путем кратковременного нажатия кнопки, которая происходит при опускании крышки. Крышка предохраняет от засветки часть пленки находящийся не под световым окном. Для индикации засветки применяется светодиод, подключенный через конденсатор, который увеличивает время горения светодиода, что позволяет визуально фиксировать момент срабатывания устройства, что затруднительно при кратковременном загорании основной лампочки.

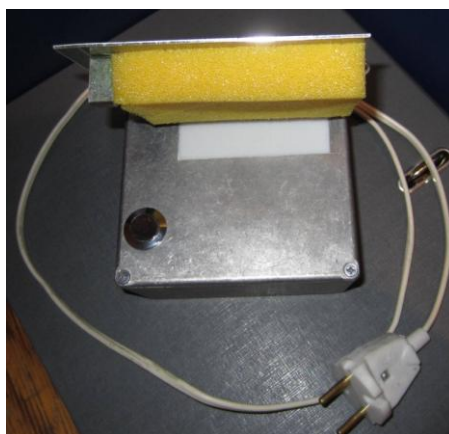


Рис.6. Прототип маркирующего устройства.

Полученная в результате испытаний прототипа маркирующего устройства пленка, имеет легко читаемую маркировку, изображенную на рисунке 7, не поддающуюся удалению или исправлению. Таким образом, можно, утверждать, что данное устройство соответствует всем параметрам, изначально предъявляемым к разработке способа маркировки рентгеновских снимков.



Рис.7. Маркировка нанесенная при помощи засвечивания а) в негативе; б) в позитиве.

Использование данного прототипа в производственных условиях выявило ряд параметров, которые требуют доработки. Так в частности, необходима регулировка яркости светового излучения рабочего окошка, в связи с тем, что пленка с разной чувствительностью

по-разному реагирует и на свет. Первичные испытания устройства проводились на пленке AGFA NDT D4. Это мелкозернистая пленка с очень высоким контрастом. При маркировке данной пленки, слой черной принтерной краски на листе бумаги, защищал пленку от засвечивания, и засветка происходила, только в непропечатанной области. Попытка маркировки пленки AGFA NDT F8, разработанной специально для применения с флуорометаллическими экранами, привело к полному засвечиванию пленки в области рабочего окошка. Читаемую маркировку удалось получить только при значительном снижении яркости светового излучения рабочего окошка, пленка AGFA NDT D4 при маркировке на данной яркости, осталась без видимых изменений. Все полученные данные изображены на рисунке 8. Следовательно, для более качественной работы устройства, необходимо регулировать яркость светового излучения.

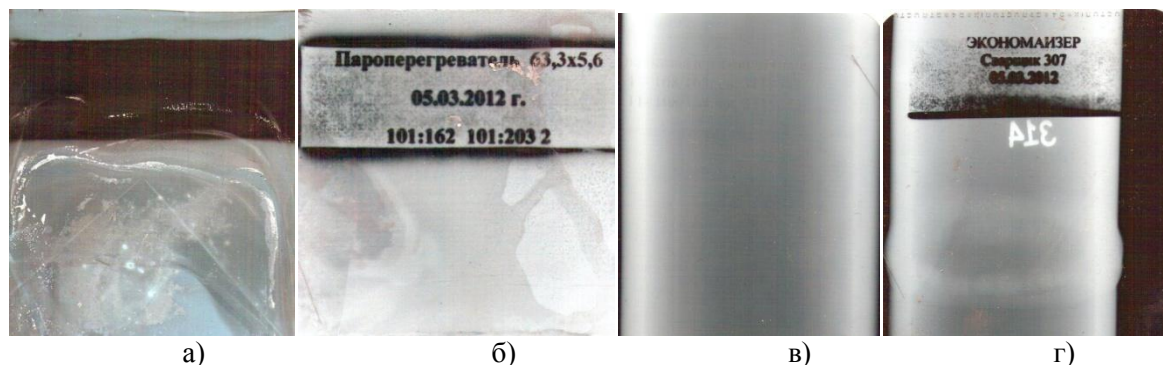


Рис.8. Маркировка пленки при различной яркости а) пленка AGFA NDT F8 при большой яркости; б) пленка AGFA NDT F8 при малой яркости; в) пленка AGFA NDT D4 при малой яркости; г) пленка AGFA NDT D4 при большой яркости.

Еще одним выявленным минусом устройства, явился индикаторный светодиод, который засвечивает близкорасположенную часть пленки или находящиеся рядом пленки. Эксперименты показали, что светодиоды красного свечения не являются актиничными и достаточно эффективно засвечивают рентгеновскую пленку. Таким образом яркость свечения индикаторного светодиода нужно ограничивать.

### Выводы

Наши эксперименты показали эффективность данного способа нанесения информации на рентгеновскую пленку. Чтобы автоматизировать процесс, сделать его более простым и удобным в практическом применении, нами разрабатывается прибор, в котором наносимое изображение формируется с помощью матричного светодиодного индикатора. Применение светодиодов и электронных управляющих схем позволит формировать любую необходимую информацию и регулировать экспозицию в соответствии с типом рентгеновской пленки. Планируется также связать прибор по стандартному интерфейсу с персональным компьютером. Что еще более повысит удобство работы с ним.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешин Н.П., Щербинский В.Г. Контроль качества сварочных работ. -М.: ВЫСШАЯ ШКОЛА, 1986. - 207 с.
2. ВСН 2-148-82. Инструкция о порядке маркировки радиографических снимков и оформлению заключений по качеству сварки. - М.: ВНИИСТ. -1983. - 18 с.
3. ГОСТ 7512-82. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод. - М.: ИПК Изд-во стандартов. -2004. - 19 с.
4. ОСТ 102-51-85. Контроль неразрушающий. Сварные соединения трубопроводов. Радиографический метод. - М.: ИПК Изд-во стандартов. -2000. - 44 с.

**Сведения об авторах:**

**Алхимов Ю.В.:** 1958 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры физических методов и приборов контроля качества Института неразрушающего контроля ТПУ. Р.т.41-73-07. E-mail: alkhimov@tpu.ru. Область научных интересов: радиационный контроль, электроника и микропроцессорная техника.

**Ковалев М.К.:** 1990 г.р., магистрант кафедры физических методов и приборов контроля качества Института неразрушающего контроля ТПУ. E-mail: kovalev@tpu.ru. Область научных интересов: радиационный контроль.

УДК 658.516

## **О ПОВЕРОЧНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ (ABOUT CALIBRATION GAS MIXTURES)**

А.И. Насибулина, Ж.Б. Оспанова, Г.М. Тусупбекова  
A.I. Nassibulina, Zh.B. Ospanova, G.M. Tussupbekova

Карагандинский государственный технический университет  
E-mail: gulim\_tus@mail.ru

В статье рассматривается вопрос приготовления поверочных газовых смесей. Проведен анализ существующих методов и способов приготовления поверочных газовых смесей. Рассмотрена технологическая схема приготовления поверочных смесей в Карагандинском филиале КазИнМетр. Выполнены заказы на изготовление поверочных смесей для исследования датчика микропримесей кислорода.

The paper discusses the preparation of calibration gas mixtures. The analysis of existing methods and techniques for preparing calibration gas mixtures. We consider the flowsheet preparation of calibration mixtures in the Karaganda branch KazInMetr. Executed orders for calibration mixtures for the study of trace oxygen sensor.

### **Ключевые слова:**

Газовые смеси, поверочные смеси, производство газовых смесей.  
(Gas mixtures, calibration mixtures, the production of gas mixtures.)

Газоаналитические измерения играют важную роль в обеспечении качества продукции, безопасности производства, во внедрении новых технологий. Последние двадцать лет [1] характеризуются бурным развитием газоаналитических средств измерений: из практики исчезают устаревшие приборы ручного типа, появляются газоаналитические приборы, основанные на новых методах измерения и новой электронной базе.

По условиям эксплуатации газоанализатор должен подвергаться периодической метрологической оценке. Поверка газоанализаторов осуществляется с помощью газовых смесей с заданными метрологическими характеристиками (Мх). В связи с ростом видов контроля и мониторинга газовой среды, растет номенклатура и количество газоаналитических приборов и, соответственно, объемы газовых смесей с требуемыми Мх. Использование анализаторов непрерывного действия, основанных на относительных измерениях, требует регулярной их калибровки и поверки. Поэтому требования в отношении качества газовых смесей постоянно повышаются.

Однако широкое использование газовых смесей данного состава в настоящее время несколько затруднено тем, что набор газовых смесей в лабораториях, ограничен диапазоном концентраций и набором веществ, вследствие не только экономических причин, но и невозможностью их длительного хранения. В этой связи наиболее рациональным является приготовление стандартных смесей в лабораторных условиях непосредственно перед или во время проведения физико-химических исследований и лабораторных анализов.

Поэтому одной из основных задач повышения качества, как физико-химических исследований, так и хроматографических измерений является совершенствование существующих и создание новых способов приготовления газовых смесей известного состава.

Производство газовых смесей - многостадийный процесс, требующий тщательности проведения каждой операции, от которых в конечном итоге зависит качество газовых смесей [2]. Особенностью их производства является индивидуальность продукции и ее не серийность. Это обусловлено широкой номенклатурой выпускаемых газоанализаторов и разновидностью их шкал, а также большим количеством разнообразных процессов, в которых используются газовые смеси, включая научные исследования.

Для приготовления стандартных смесей газов служат различные методы, которые можно разделить на две группы: статические и динамические.

Статические методы основаны на вводе определенного количества исследуемого вещества в газообразном или жидком состоянии в сосуд с известной вместимостью.

Приготовление смеси статическим способом включает следующие стадии:

- 1) контроль внутренней поверхности сосуда;
- 2) вакуумирование сосуда или продувка инертным газом с одновременным нагревом;
- 3) ввод индивидуальных компонентов;
- 4) гомогенизация смеси и ее анализ.

Для приготовления смеси могут служить разнообразные емкости из металла, стекла, полимеров. Статические методы достаточно просты и почти не требуют специального оборудования, однако в большинстве случаев они мало пригодны для получения смесей с низкой концентрацией (менее  $10^{-5}$  %). Основной причиной этого является сорбционный эффект материала, из которого изготовлена емкость.

Динамические методы [3] основаны на вводе непрерывного потока исследуемых компонентов в смеситель. Этот метод дает наилучшие результаты в тех случаях, когда необходим непрерывный газовый поток с известной концентрацией, особенно когда исследуемое вещество нестабильно.

Используются различные варианты разбавления чистых баллонных газов. Одним из лучших способов создания калибровочных смесей с низкими концентрациями является способ, основанный на диффузии исследуемого газа через стенку трубки (ампулы) из полимера. Ампула с веществом помещается в термостат и обдувается непрерывным потоком газа - разбавителя. Термостатирование необходимо для контроля скорости диффузии, которая сильно зависит от температуры. Вещество из ампулы с постоянной скоростью поступает в газ - разбавитель, образуя смесь с определенной концентрацией. Калибровка смеси проводится по потере веса ампулы за продолжительное время при постоянных температуре и расходе газа - разбавителя. Этот способ используется для  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , углеводородов, бензола и других веществ. Можно получать концентрации до  $10^{-7}$  % по объему.

Выпускаемые таким способом газовые смеси предназначены для градуировки, аттестации и поверки средств измерений, аттестации методик выполнения измерений (МВИ), контроля правильности результатов измерений, полученных по стандартизованным и/или аттестованным методикам.

В основе производства газовых смесей лежат несколько аспектов, которые взаимодействуют между собой, – технологический, технический и метрологический (рисунок 1). Каждый из этих аспектов дает возможность проанализировать как сам процесс выпуска газовых смесей в промышленных масштабах, так и построить модель жизненного цикла выпускаемой продукции, точно определяя все требования, предъявляемые к стандартному образцу состава газовой смеси (СОС ГС).

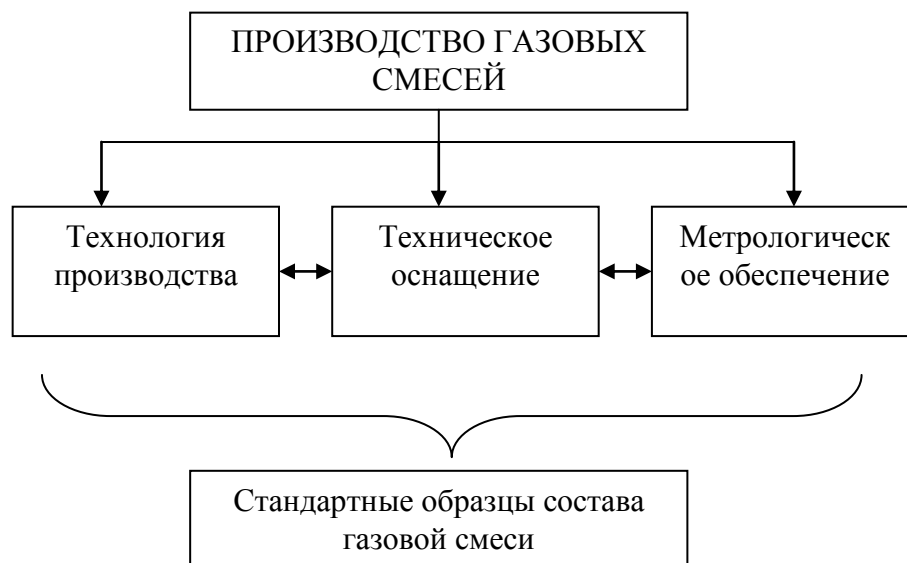


Рис. 1. Структура производства газовых смесей

В соответствии с рисунком 1 выходной продукцией производства являются СОС ГС, которые представляют собой двух-, трех- и многокомпонентные смеси газов, выпускаемые по трем разрядам: нулевого, входящего в состав государственного эталона единицы молярной доли компонентов в газовых средах, первого и второго разрядов.

В производстве реализовано два метода дозирования компонентов – гравиметрический и метод парциальных давлений.

Способ парциальных давлений, состоящий в использовании закона Дальтона [4] при смешении газов, в соответствии с которым сумма парциальных давлений  $p_i$  равна давлению смеси  $p_{см}$ , т.е.

$$p = \sum_{i=1}^n p_i ,$$

где суммирование проводится по  $n$  компонентам смеси.

Предварительно по заданному конечному давлению смеси и задаваемыми содержаниями  $x_i$  компонентов смеси рассчитывают давления  $p_i$  каждого компонента по формуле

$$p_i = x_i \cdot p_{см} ,$$

С учетом результатов расчетов каждый из компонентов поочередно дозируют в баллон, контролируя по манометру парциальные давления  $p_i$ . Такой способ приготовления смесей осложнен отклонением законов, описывающих состояние идеальных газов, от законов для случая реальных газов. Величина отклонения для каждого газа определяется коэффициентом сжимаемости

$$z_i \cdot p_i = z_i \cdot x_i \cdot p_{см} .$$

Коэффициент сжимаемости зависит от температуры газа в баллонах. Учесть в процессе производства смесей это обстоятельство (особенно в случае приготовления многокомпонентных смесей) довольно трудно, следствием чего являются отклонения от номинального значения содержания, называемые погрешностью приготовления смеси. Поэтому после приготовления смесь должна пройти аттестацию, т.е. должна быть проанализирована с привлечением образцового средства измерения.

Основными операциями метода парциальных давлений являются:

- а) расчет давлений компонентов газовой смеси;
- б) проверка герметичности системы и вентиляей;
- в) приготовление газовой смеси;
- г) гомогенизация смеси;
- д) анализ смеси, расчет состава и неопределенности.

Гравиметрический (или весовой) способ заключается в последовательном дозировании компонентов смеси в баллон и проведении взвешивания с целью нахождения массы вводимых компонентов. Массу компонента определяют как разность результатов взвешиваний до и после введения компонента. По результатам взвешивания, с учетом чистоты исходных газов, определяют содержание каждого компонента в смеси (молярную долю):

$$n_i = \frac{q_i}{m_i \sum} \cdot \frac{q_i}{m_i} ,$$

где  $m_i$  — масса одного моля компонента.

На практике используются весы, на которых возможно взвешивание масс до 30 кг с точностью до 3 мг, 50 кг с точностью 3 мг и 100 кг с точностью 10 мг.

В гравиметрическом методе согласно ИСО 6142 выделяют:

- а) определение состава смеси, расчет неопределенности и давления окончательной смеси;
- б) определение возможности получения такой смеси;
- в) проведение входного контроля исходных газов;
- г) выбор процедуры приготовления;
- д) приготовление газовой смеси;
- е) вычисление состава смеси и неопределенности.

Выделив стадии технологического процесса в каждом из способов приготовления, смоделирована обобщенная технологическая схема процессов приготовления (рисунок 2), которая используется в производственном цехе Карагандинского филиала Казахстанского Института Метрологии (КазИнМетр).

Основными исходными компонентами, используемыми в процессе приготовления газовых смесей [4] являются чистые газы: азот, аргон, водород, воздух, окись и двуокись углерода, кислород, метан, пропан, гелий.

Согласно технологическому регламенту СТ КФ РГП 38969790-003-2009 все газы, используемые в производстве газовых смесей, должны пройти входной контроль.

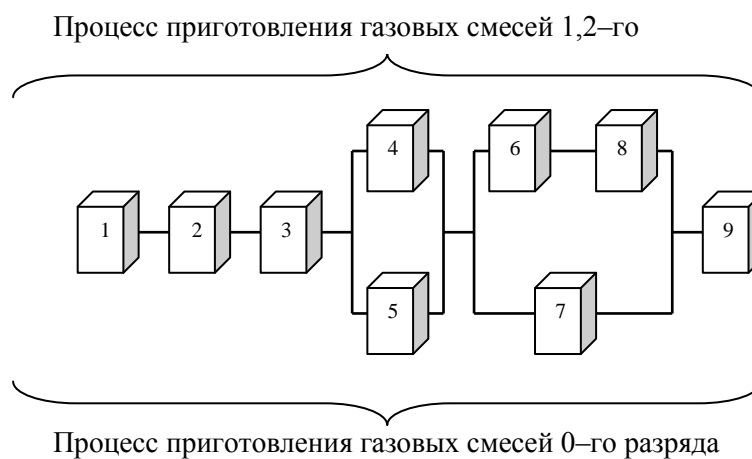


Рис. 2. Схемы процессов приготовления

- 1 – подготовка баллонов;
- 2 – аналитический контроль исходных газов;
- 3 – расчет параметров дозирования;
- 4 – дозирование при контролируемом давлении;
- 5 – измерение массы дозируемых газов;
- 6 – гомогенизация смеси;
- 7 – расчет содержания целевого компонента в смеси;
- 8 – анализ смеси;
- 9 – аттестация.

В соответствии с рисунком 2 в основе производства газовых смесей первого и второго разряда лежит смешивание исходных газов в заданном соотношении методом парциальных давлений (манометрическим) на газосмесительной установке и последующая аттестация состава смесей на аналитическом оборудовании в сравнении с газовыми смесями нулевого разряда. Приготовление двухкомпонентной газовой смеси [5] основывается на дозировании первого компонента с меньшим парциальным давлением, а затем производится дозирование второго компонента до заданного давления смеси. В основе приготовления трехкомпонентной смеси также лежит принцип дозирования компонентов в соответствии с их парциальными давлениями, начиная с минимального, последний компонент дозируют до заданного давления смеси. Аналогично производится дозирование многокомпонентных смесей.

Производство газовых смесей нулевого разряда основано на смешивании исходных газов в заданном соотношении методом парциальных давлений на газосмесительной установке и последующей аттестации состава газовой смеси на гравиметрическом комплексе.

Для проведения исследовательских работ по разработке датчика микропримесей кислорода экспресс-анализатора в производственном цехе КазИнМетр были изготовлены газовые смеси различной концентрации. Экспресс-анализатор ЭАК-7723 использует [6] оптико-люминесцентный датчик и позволяет измерять объемную долю микропримеси кислорода в нейтральных газах от 1 до 25 млн<sup>-1</sup>. Опытные образцы экспресс-анализатора микропримеси кислорода в нейтральных и инертных газах выпущены АО Казчерметавтоматика (г.Караганда).



### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Востриков С.Н., Ефимов А.Н., Левин И.В., Угроватов А.Е., Уткин В.Н. Проблемы обновления рынка смесей технических газов // Технические газы. – 2005 - №1 – С. 60 – 64.
2. Соколов Б.К., Егоров В.А., Лисняк В.Е. Поверочные газовые смеси. – Обзоры по отдельным производствам химической промышленности. – М.: НИИТЭХИМ, 1976. – вып.16(106) – С. 42.
3. Баскин, З. Л. Динамические методы градуировки и проверки метрологических характеристик средств газоаналитических измерений [Текст]: (обобщающая статья) / Баскин З. Л. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2007. - Т. 73, N 2. - С. 72-78.
4. Смесь стерилизованная окись этилена — двуокись углерода / Технические условия / ТУ 2114-003-45905715-04 / ОКП 21 1499 / Группа Л11.
5. Смеси газовые (бинарные и многокомпонентные) / Технические условия / ТУ 2114-002-45905715-04 / ОКП 21 1499 / Группа Л11.
6. Намазбаев Т.С. Средства измерения и контроля технологических процессов на предприятиях горно-металлургического комплекса: Учеб.пособие/ Т.С. Намазбаев, С.Х. Есенбаев, В.А. Колесников; Карагандинский государственный технический университет. – Караганда,КарГТУ,2012.–107с.

#### **Сведения об авторах:**

**Насибулина А.И.:** магистр Карагандинского государственного технического университета.

**Оспанова Ж.Б., Тусупбекова Г.М.:** магистранты Карагандинского государственного технического университета, Республика Казахстан, г. Караганды, сфера научных интересов – наука в измерениях.

**Есенбаев С.Х.:** Карагандинский государственный технический университет, к.т.н., доцент.

УДК. 662.997.05(043)

## ОПТИМИЗАЦИЯ ДВУХОСЕВОЙ СИСТЕМЫ СЛЕЖЕНИЯ ЗА СОЛНЦЕМ (OPTIMIZATION OF TWO-AXIS SOLAR TRACKING SYSTEM)

М.В. Китаева, А.В. Охорзина, А.В. Скороходов\*, А.В. Юрченко  
M.V. Kitaeva, A.V. Ohorzina, A.V. Skorohodov\*, A.V. Yurchenko

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
\* ОАО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов»  
E-mail: ameba\_89@mail.ru

Произведен расчет эффективности применения систем слежения за солнцем для фотоэлектрических установок в г. Томске. Создан фотоэлектрический датчик для ориентирования на Солнце. Созданы макеты одноосевой и двухосевой систем слежения на основе фотоэлектрического датчика. Оптимизирована система слежения.

(The calculation results for the tracking systems effectiveness in Tomsk have been presented. The solar tracking system based on the photoelectric sensor has been designed. Prototypes of solar power complexes with single and two-axis tracking systems have been designed. The tracking system has been optimized.)

### Ключевые слова:

Фотоэлектрический модуль (ФМ), система слежения за солнцем, одноосевая система, двухосевая система.

(Photovoltaic panel, solar tracking, single-axis tracker, two-axis tracker.)

Человечеству нужна энергия, причем потребности в ней увеличиваются с каждым годом. Вместе с тем запасы традиционных природных топлив (нефти, угля, газа и др.) конечны. В связи с указанными проблемами становится все более необходимым использование нетрадиционных энергоресурсов, в первую очередь солнечной, ветровой, геотермальной энергии, наряду с внедрением энергосберегающих технологий.

Среди возобновляемых источников энергии солнечная радиация по масштабам ресурсов, экологической чистоте и повсеместной распространенности наиболее перспективна.

Актуально применение солнечных энергетических установок (СЭУ) в регионах без стационарной сети электропитания. Замена дизельных генераторов на СЭУ в таких регионах не только помогает облегчить энергетические и экологические проблемы, но и является экономически выгодной.

Основным фактором, ограничивающим широкое применение солнечной энергетики на практике, является стоимость энергетических систем на его основе[1].

Снижение стоимости производства электроэнергии такими системами возможно за счет снижения стоимости СБ или повышения КПД.

Реализация первого способа возможна следующими путями:

- удешевлением производства - созданы цеха автоматического производства СБ, для обслуживания которых необходима пара человек;
- удешевлением кремния путем замены монокристалла кремния на поликристалл и мультикристалл кремния;

Для повышения КПД солнечных элементов можно:

- используя тандемные установки, многослойный фотоприемник на гетеропереходах, хотя это увеличивает стоимость;
- применяя, двусторонние фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), что незначительно улучшает эффективность;
- добавив различные концентраторы, которые наряду с увеличением фотоответа, сопровождаются повышением температуры элементов, что негативно влияет на КПД;
- введя систему слежения за Солнцем.

Последний вариант является наиболее приемлемым, так как даже при эффективной стационарной установки СБ проигрыш в вырабатываемой мощности достигает 50%, чем при

непрерывном ориентировании на солнце. Следящая система обеспечивает более равномерное генерирование электричества с восхода до захода солнца.

Ориентирование на Солнце возможно с применением одноосных и двухосных систем.[2]

Также существует еще несколько способов слежения за солнцем:

- ручная наводка на солнце;
- пассивные системы (основаны на программировании алгоритма управления СБ);
- активные системы.

Ручная наводка обладает меньшей точностью и требует постоянного обслуживания оператором, но проста.

Пассивный способ основан на слежении за солнцем по азимуту и углу, рассчитано постоянных характеристик для географического места установки. Такие системы обеспечивают необходимую скорость вращения в азимутальном и вертикальном направлениях с учетом времени года. Недостатком данного метода является введение поправок на сезонную высоту склонения солнца, сложность программирования и приемлемость программы только для одного географического положения.

Наибольшее развитие получили активные системы. Они применяются как для ориентирования солнечных батарей на земле, так и для ориентации в космических аппаратах.

### Расчет приходящей мощности

*Инсоляцией* (от латинского *in solo* – выставляю на солнце) называется облучение параллельным пучком лучей, поступающих с направления солнечного диска. Инсоляция значительно изменяется при переходе от одной точки земной поверхности к другой. Инсоляция зависят еще от ряда немаловажных факторов:

- времени года, обуславливающего более малую освещенность и долготу дня зимой;
- времени суток, т.к. солнечные лучи в течении дня не одинаково эффективны, вдобавок лучи, падающие на поверхность солнечной батареи под очень малым углом, малопригодны для использования.
- местных погодных условий (облачность, туман, дождь, снег).

Величиной, оказывающей влияние на интенсивность облучения ФМ, является *угол падения* солнечных лучей на её поверхность. Применение *систем слежения* позволит изменять угол в зависимости от положения Солнца, что увеличит количество пришедшей мощности на поверхность ФМ.

Для расчета интенсивности потока солнечного излучения, поступающего на наклонную лучепоглощающую поверхность, необходимо знать углы падения солнечных лучей на нее.

Проведем расчет эффективности применения систем слежения. Для этого определим количество солнечной радиации, поступающей в течение дня [3]. Для удобства расчета будем считать, что Солнце вращается вокруг неподвижной Земли, Не смотря на то, что на самом деле Земля вращается вокруг Солнца.

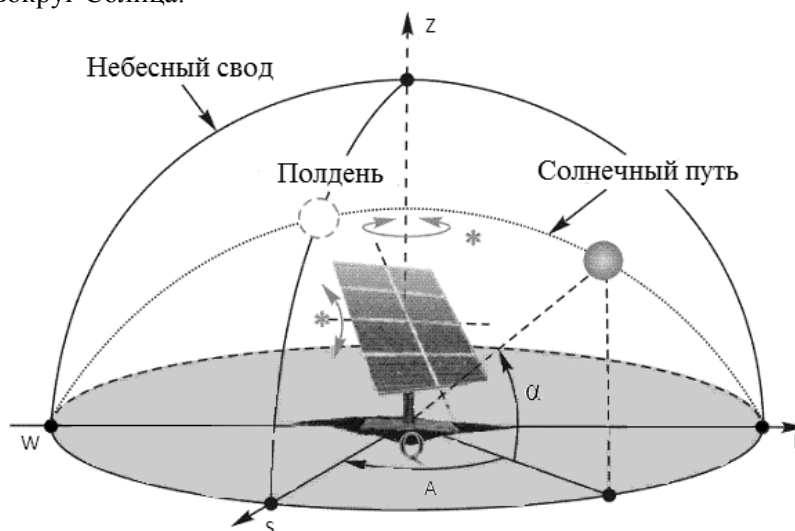


Рис. 1. Движение солнца по небосводу

При прохождении атмосферы потоком солнечного излучения он теряет свою интенсивность из-за поглощения озоном, углекислым газом и водяным паром, а также рассеянием твердыми частицами и Релея. Рассеяние и поглощение увеличиваются с увеличением пути потока солнечных лучей, поэтому вводится поправочный коэффициент для аппроксимации [4]:

$$K_{A\delta} = 1,1254 - \frac{0,1366}{\sin \alpha} \quad (1)$$

Где  $\alpha$  - солнечная высота.

Определим основные солнечные углы и их соотношения для различных способов слежения за солнцем.

•  $\omega$  – часовой угол, измеряется в градусах. Часовой угол увеличивается на 15 градусов каждый час и равен нулю в солнечный полдень.

$$\omega = 15(t_s - 12)$$

Где  $t_s$  – солнечное время в часах.

•  $\delta$  – склонение, равняется угловому расстоянию на небесной сфере от плоскости небесного экватора до светила и выражается в градусах дуги. Склонение положительно к северу от небесного экватора и отрицательно к югу.

$$\sin \delta = 0,39795 \cos[0,98563(N - 173)]$$

Где N – номер дня

•  $\alpha$  – солнечная высота, определяется как угол между падающими лучами от солнца и горизонтальной плоскостью.

$$\alpha = \sin^{-1}(\sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \cos \phi)$$

•  $\theta_z$  – зенитный угол, является дополнительным к солнечной высоте.

$$\theta_z = 90^\circ - \alpha$$

• A - солнечный азимут. Это угол, измеренный по часовой стрелке в горизонтальной плоскости с севера. Измеряется в градусах.

$$A' = \sin^{-1}\left(\frac{-\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha}\right)$$

$$\text{если } \cos \omega \geq \left(\frac{\tan \delta}{\tan \phi}\right), \text{ то } A = 180^\circ - A'$$

$$\text{если } \cos \omega < \left(\frac{\tan \delta}{\tan \phi}\right), \text{ то } A = 360^\circ + A'$$

Для определения количества излучения приходящего на произвольно ориентированную площадку введем понятия угла отслеживания  $\theta_i$ , выражающего угол между направлением солнечных лучей и нормалью к площадке. Рассмотрим основные случаи расположения фотоэлектрического модуля: параллельно к поверхности земли, ориентирован на юг под углом к горизонту, отслеживает движение солнца по 1 или 2 координатам.

Рассмотрим систему координат с центром Q, связанную с землей.

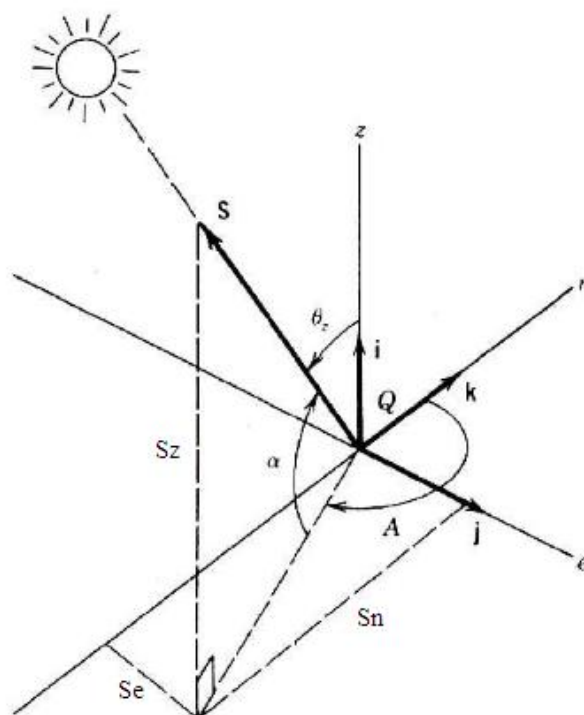


Рис. 2. Описание движения Солнца относительно Земли.

Из рисунка 2 видно, что вектор  $S$  представляет собой направление на солнечный диск:

$$S = S_z i + S_e j + S_n k$$

где  $i, j, k$  и единичные векторы вдоль  $Z, E,$  и  $N$  осей соответственно. Направляющие косинусы  $S_z, S_e$  и  $S_n$  по отношению к  $Z, E,$  и  $N$  осям, соответственно. Они могут быть записаны в терминах высоты солнца и азимута, как

$$\begin{aligned} S_z &= \sin \alpha \\ S_e &= \cos \alpha \sin A \\ S_n &= \cos \alpha \cos A \end{aligned} \quad (2)$$

Косинус угла падения на произвольно ориентированную поверхность, которая не отслеживает, может быть описано с точки зрения ее ориентации и высоты и азимута угла солнца. Выражение для этого скалярное произведение единичного вектора  $S$  (ориентация поверхности) и единичного вектора  $N$  (нормаль к поверхности).

Для определения  $N$  с использованием тех же осей, мы определим угол наклона  $\beta$  плоскости ФМ и азимута  $\gamma$  как изображено на рисунке 3 (правило знаков  $\gamma$  так же, как для солнечного азимута  $A$ , который измеряется с севера по часовой стрелке). Направляющие косинусы  $N$  вдоль  $z, e,$  и  $n$  осей, соответственно,

$$\begin{aligned} N_z &= \cos \beta \\ N_e &= \sin \beta \sin \gamma \\ N_n &= \sin \beta \cos \gamma \end{aligned} \quad (3)$$

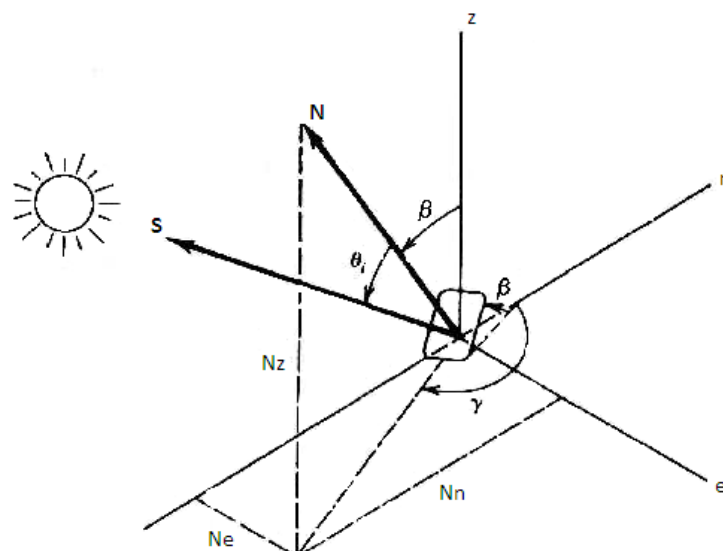


Рис. 3. Фиксированное положение ФМ с его ориентацией, определяемой углом наклона  $\beta$ .

Косинус угла между падающими солнечными лучами и нормалью есть скалярное произведение этих двух единичных векторов:

$$\cos \theta_i = \mathbf{S} \cdot \mathbf{N}$$

Применив формулы (2) и (3), имеем выражение для косинуса угла падения при фиксированной панели:

$$\cos \theta_i = \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta \cos(\gamma - A) \quad (4)$$

Бывает полезно записать уравнение (4) с точки зрения широты, склонение и часовой угол

$$\cos \theta_i = \cos \beta (\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega) - \cos \delta \sin \omega \sin \beta \sin \gamma + \sin \beta \cos \gamma (\sin \delta \cos \phi - \cos \delta \cos \omega \sin \phi) \quad (5)$$

Для горизонтального положения, угол наклона  $\beta$  равен нулю, а уравнение (5) становится

$$\cos \theta_i = \sin \alpha \quad (6)$$

и для наклонной плоскости с южной стороны, у нас есть

$$\cos \theta_i = \sin \alpha \cos \beta - \cos \alpha \sin \beta \cos A \quad (7)$$

Некоторые виды ФМ предназначены для работы с отслеживанием вращения вокруг только одной оси. Падающие лучи ( $\mathbf{S}$ ) и нормаль ( $\mathbf{N}$ ) лежат в одной плоскости. Рисунок 4 показывает, как вращается плоскость ФМ вокруг оси отслеживания  $\gamma$ , и взаимное расположение векторов  $\mathbf{S}$  и  $\mathbf{N}$ , которые образуют угол падения  $\theta_i$ .

В общем случае слежение по единой горизонтальной оси:

$$\cos \theta_i = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 (A - \gamma)}$$

Частный случай этого уравнения часто встречается в практике, когда отслеживание оси ориентированы в направлении восток-запад, именно этот случай представляет интерес для расчетов.

$$\cos \theta_i = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 A} \quad (8)$$

С двумя осями слежения, ФМ всегда будет нормальна к солнцу. Поэтому эффект косинуса не вступает в игру:

$$\cos \theta_i = 1$$

Приходящая мощность может быть рассчитана по формуле [4]

$$I_h = K_{Ai} \cdot I_0 \cdot \cos \theta_i,$$

Где  $I_0$  – солнечная константа, равная  $1367 \text{ Вт/м}^2$ .

Подставляя поочередно формулы (6), (7), (8), (9), мы получим значения приходящей мощности для ФМ расположенного горизонтально и под углом к горизонту, с использованием систем слежения.

### Результаты расчетов

На рисунках 4 и 5 приведены результаты работы двух- и одноосевой систем, ФМ, установленной под углом горизонту и лежащую горизонтально в г. Томске. Из рисунка 4 видно, что значительный выигрыш по сбору мощности летом относительно горизонтально расположенного ФМ наблюдается при использовании систем слежения. Разница в выработанной мощности небольшая, двухосная система позволяет собрать больше мощности в утренние и вечерние часы. Выигрыш при использовании систем слежения относительно стационарного ФМ, закрепленного под углом к горизонту, составит порядка 50 %.

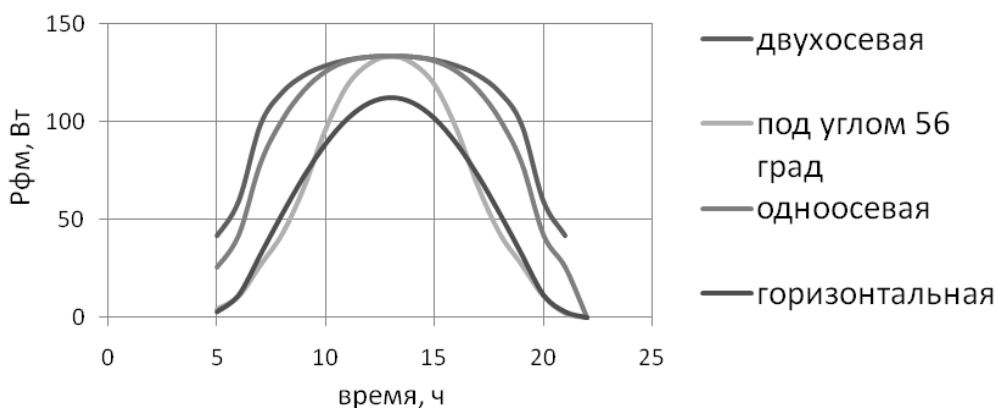


Рис. 4. График зависимостей вырабатываемой мощности ФМ: расположенной горизонтально, с применением систем слежения и установленной под углом к горизонту в Томске (июнь).

Из рисунка 5 видно, что максимальный выигрыш по сбору мощности зимой относительно горизонтально расположенного ФМ наблюдается при использовании двухосной системы, сбор мощности увеличивается в 4 раза. Разницы между использованием следящей однокоординатной и стационарно установленной под углом (равным широте) к горизонту систем практически не наблюдается, но их использование позволяет увеличить сбор мощности относительно горизонтальной в 2,5 раза.

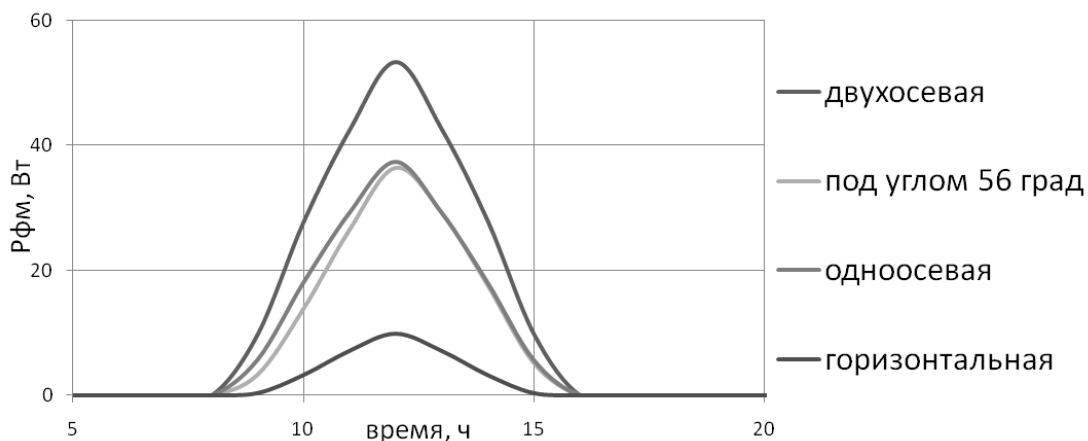


Рис. 5. График зависимостей вырабатываемой мощности ФМ: расположенной горизонтально, с применением систем слежения и установленной под углом к горизонту в Томске (декабрь).

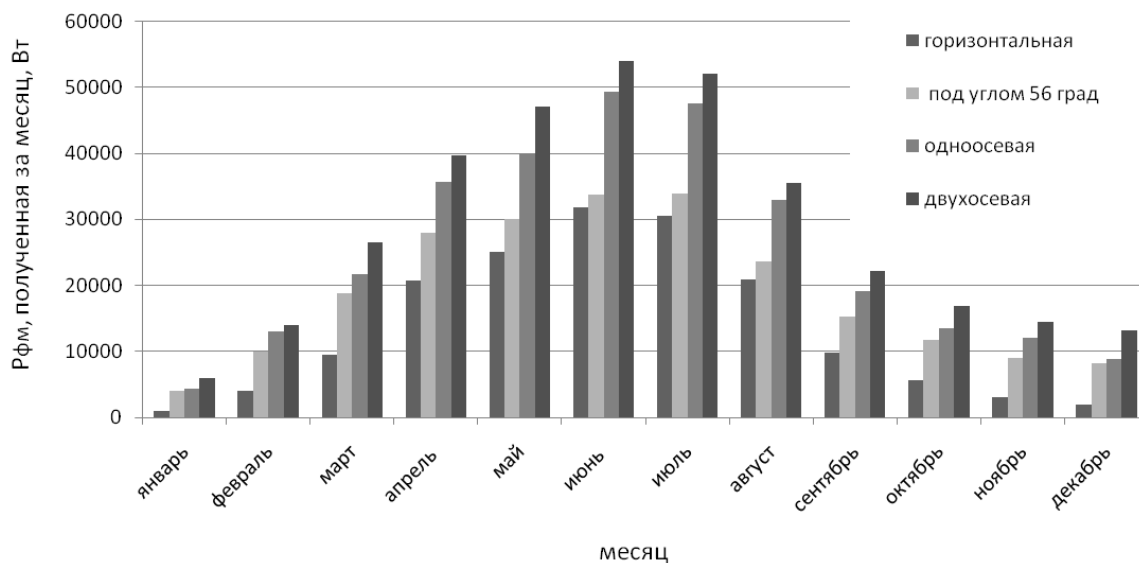


Рис. 6. Эффективность применения систем слежения в Томске.

Установка однокоординатной системы слежения позволит повысить эффективность фотоэлектрической установки на 20...30 %, уменьшить срок окупаемости системы на 3–5 лет. Добавление второй координаты слежения позволит увеличить мощность на 7...10 %.

#### Фотоэлектрический датчик

На сегодняшний день существует большое количество решений для датчика положения Солнца на небосводе. Отличают датчики, основанные на фотодиодах, фоторезисторах, фотоэлектрических преобразователях, термочувствительных элементах.

На основе проведенного анализа датчиков для систем слежения разработан фотоэлектрический датчик (ФЭД), позволяющий исключить влияние фонового излучения, решить проблему запуска системы утром, отличающийся низкой ценой и простотой конструкции. Проведены математические расчеты конструкции датчика, которые были подтверждены его натурными испытаниями в г. Томске. Результаты позволили оптимизировать датчик и увеличить его чувствительность.

В качестве фоточувствительных элементов выбран кремниевый фотоэлектрический преобразователь (ФЭП). Датчик состоит из трех чувствительных элементов (рис. 7). Два лицевых элемента А и В для определения положения Солнца, третий тыловой элемент (С) – для исключения влияния рассеянного излучения и для запуска системы утром.

Элементы А и В установлены на разные стороны перегородки, что позволяет скомпенсировать влияние разности температур. Также перегородка служит токопроводящим элементом. Элемент С необходим для измерения рассеянного излучения, исключения его влияния на два других датчика и запуска системы в утренние часы. Он расположен так, чтобы его плоскость была повернута от Солнца, таким образом, он измеряет только фоновое излучение. Утром, в то время как лицевые элементы отвернуты от Солнца, тыльный ориентирован на него, что воспринимает блок контроллера и подает команду поворота ФМ на восток.

Особенности разработанного датчика:

1. Использование ФЭП в качестве активного элемента и добавление в конструкцию тылового ФЭП для измерения фонового излучения и запуска систем в утренние часы.
2. Обеспечивается единая температура всех элементов .
3. В качестве регулирующего сигнала используется ток короткого замыкания  $I_{кз}$  ФЭП, т. к. зависит от интенсивности солнечного излучения и не зависит от температуры.

Главными преимуществами данного метода являются точность наведения, необходимая для ФМ и простота использования.



Для оптимизации конструкции датчика проведены математические расчеты и его натурные испытания при использовании разных углов между элементами А и В, которые показали, что максимальная чувствительность датчика достигнута при угле  $20^\circ$ , что видно на приведенной диаграмме направленности и графике зависимости чувствительности датчика от угла наклона между элементами (рис. 7). Как мы видим, при выбранном угле разница между сигналами А и В максимальна [5]

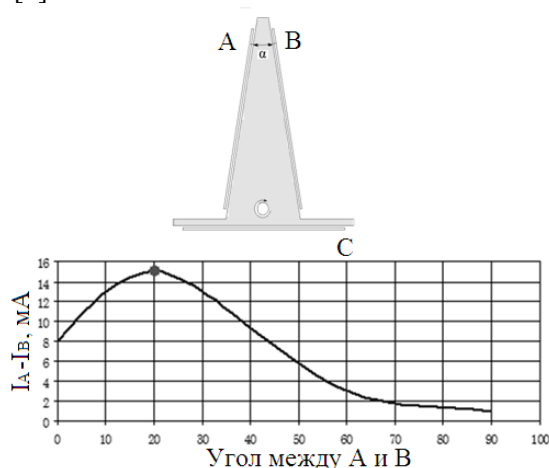


Рис. 7. Зависимость отклика ФЭД в зависимости от угла между элементами А и В.

#### Система слежения на основе ФЭД

На основе ФЭД разработана система слежения за Солнцем. Создан пилотный образец энергосистемы мощностью 50 Вт и проведены ее натурные испытания в течение года.

Система слежения за Солнцем должна иметь в своём составе:

- первичный преобразователь светового потока в ток (ФЭД);
- устройства обработки сигналов с датчика и выработки управляющих сигналов для двигателя (блок контроллера);
- двигатель, обеспечивающий поворот ФМ.

Схема системы слежения за Солнцем (рис. 8) состоит из ФЭД, преобразователя ток–напряжение ( $I/U$ ), операционного усилителя (ОУ), микроконтроллера (МК) Atmega8L, устройства управления шаговым двигателем (УУШД), и шагового двигателя (ШД) [6].

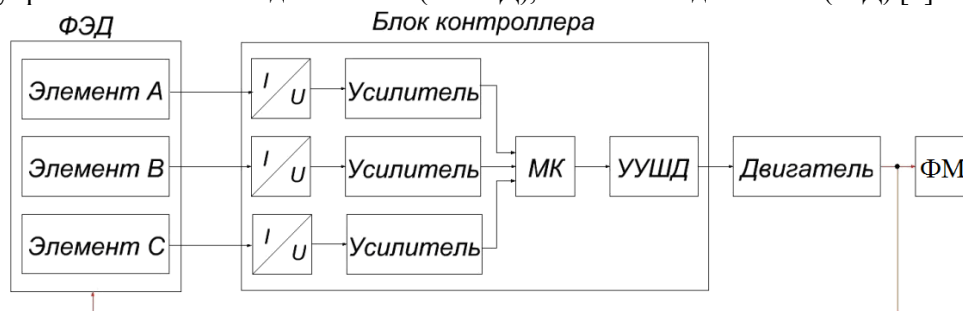


Рис. 8. Структурная схема системы слежения.

На основе структурной схемы разработана принципиальная схема блока контроллера. По принципиальной схеме разработана печатная плата блока контроллера с возможностью питания от аккумулятора ФМ, сконструирован корпус для блока контроллера. Создан алгоритм работы программы МК, позволяющий ориентировать систему на Солнце.

Работоспособность системы слежения подтверждена практически: создан экспериментальный макет систем для ФМ мощностью 50 Вт. Были проведены натурные испытания одноосевой системы (рис. 9) и двухосевой (рис. 10).

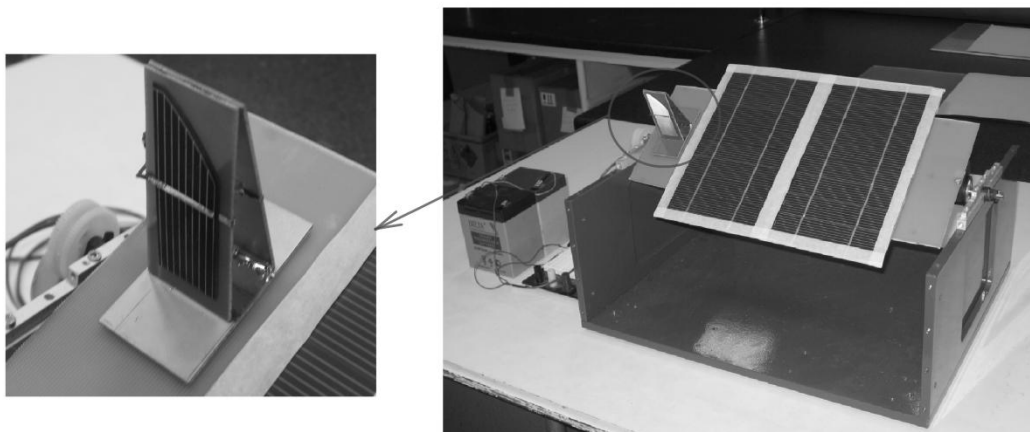


Рис. 9. Экспериментальный макет одноосевой системы слежения.



Рис. 10. Экспериментальный макет двухосевой системы слежения.

### Расчет шага системы

Расчет шага системы необходим для экономичной работы системы слежения. Исходя из анализа диаграмм направленности ФМ [5], видно, что в пределах отклонения  $15^\circ$  от нормали не происходит заметного снижения вырабатываемой мощности. Таким образом, дискретная работа системы обеспечит снижение энергопотребления движущимися частями системы слежения.

Зафиксируем ФМ в одном положении на длительное время и рассчитаем изменение вырабатываемой мощности со временем.

$$P_{\partial i} = \dot{E} \ddot{A}_{\partial i} \cdot I_0 \cdot K_{\lambda \partial} \cdot \cos \theta_i \cdot \cos(\alpha_2 - \alpha_1)$$

Формула отображает количество выработанной мощности со времени, где  $\cos(\alpha_2 - \alpha_1)$  путь пройденный солнцем за промежуток времени.

На рисунке 11 представлена зависимость выигрыша в вырабатываемой мощности ФМ относительно горизонтального положения от времени, в течение которого ориентирование не производилось.

Из рисунка 11 видно, что, не изменяя направление ориентирования, система функционирует без значительного снижения мощности: для двухосевой системы в течение 1 часа, для одноосевой - полчаса.

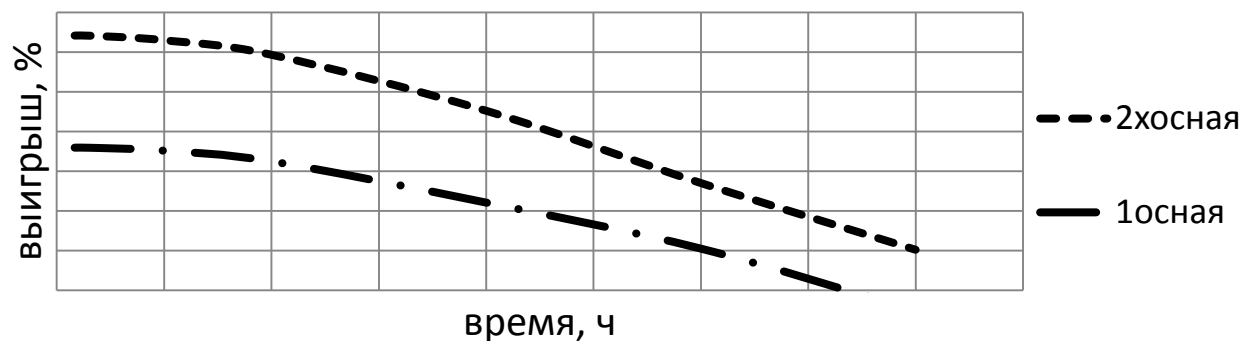


Рис. 11. Динамика вырабатываемой мощности ФМ, когда система слежения не ориентируется на солнце.

#### Выводы

1. Построена модель работы энергосистемы с использованием системы слежения в Томске в течение года. Рассчитана эффективность применения систем слежения.
2. Сконструирован ФЭД, создан макет и проведена его оптимизация, разработаны структурная и принципиальная схемы блока контроллера для системы слежения, его печатная плата, разработан алгоритм программы для МК.
3. Созданы экспериментальные образцы систем слежения, доказавшие рентабельность использования систем слежения: одноосной системы увеличили сбор мощности на 23%, а двухосной на 32%.
4. Оптимизирован алгоритм работы двухосевой системы слежения

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юрченко А.В., Саврасов Ф.В., Юрченко В.И. Реальная стоимость энергии - от ресурсов до потребителя //Известия Томского политехнического университета, 2009 - т. 314, - № 3. - с. 43-46.
2. Юрченко А.В., Волгин А.В., Козлов А.В. Статическая модель кремниевых солнечных батарей, работающих под воздействием природных и аппаратных факторов //Известия Томского политехнического университета, 2009 - т. 314, - № 4. - с. 142-148.
3. W. Stine, M. Geyer. Power From The Sun// PowerFromTheSun.net URL: <http://www.powerfromthesun.net/index.html> (дата обращения 25.04.2012).
4. Кидрук М.И. Расчет потока солнечной радиации // progress21.com URL: <http://progress21.com.ua/ru/articles/solarradiation> (дата обращения 23.04.2012).
5. Охорзина А.В., Китаева М.В., Волгин А.В., Юрченко А.В. Фотоэлектрический датчик для систем слежения за солнцем //Информационно-измерительная техника и технологии: Сборник материалов I Научно-практической конференции посвященной 50-летию кафедры «Информационно-измерительная техника» Национального исследовательского Томского политехнического университета/ под ред. А.В. Юрченко; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. - С. 37-38.
6. Охорзина. А. В, Китаева М. В., Суматохина К. В. Оптимизация фотоэлектрического датчика для системы ориентации солнечных энергетических систем // Современные техника и технологии: Сборник трудов XVII международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в 3-х частях. - Томск: Издательство ТПУ. – 2011. - Т. 1 - С. 235-236.

#### Сведения об авторах:

- Китаева М.В.:** г. Томск, аспирант Института неразрушающего контроля ТПУ.  
E-mail: [kitaevam@tpu.ru](mailto:kitaevam@tpu.ru). Область научных интересов: солнечная энергетика, системы слежения за Солнцем.
- Охорзина А.В.:** г. Томск, магистрант Института неразрушающего контроля ТПУ.

III Научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии»,  
3-5 мая 2012 г.

E-mail: ameba\_89@mail.ru. Область научных интересов: системы слежения за Солнцем.

**Юрченко А.В.:** г. Томск, заведующий лабораторией «физики солнечных элементов», профессор кафедры ИИТ Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: niipr@inbox.ru. Область научных интересов: физика солнечных элементов, возобновляемая энергетика.

**Скороходов А.В.:** г. Томск, инженер-конструктор ОАО «НИИПП».

E-mail: kitaevam@tpu.ru. Область научных интересов: системы контроля параметров энергетических комплексов на основе возобновляемых источников энергии.

УДК 004.47

**ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРИБОРОВ И МЕТОДОВ  
ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА  
(PRACTICAL APPLICATION OF ULTRASONIC DEVICES AND METHODS FOR  
MEASURING THE VELOCITY AND DIRECTION OF MOTION OF AIR FLOW)**

А.Д. Плотников  
A. Plotnikov

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова  
г. Барнаул  
E-mail: adplotnikov@gmail.com

Проведен обзор методов измерения скорости воздушных потоков. Определены преимущества ультразвукового метода измерения скорости потока. Произведен выбор ультразвуковых датчиков и описан принцип работы разработанного ультразвукового анемометра. Произведена оценка погрешности измерения.

(A review of methods for measuring the velocity of air flow. Identified the advantages of the ultrasonic method for measuring the velocity of flow. Produced by the choice of ultrasonic sensors and describes how the work developed by the ultrasonic anemometer. The estimation of measurement uncertainty.)

**Ключевые слова:**

Анемометр, скорость потока, ультразвук.  
(Anemometer, the velocity of flow, ultrasonic.)

Проблема измерения скоростей воздушных потоков и определения направления их перемещения актуальна в промышленности, в медицине, в системах экологического мониторинга, в системах автоматического управления, в системах климат-контроля и т.п.

Существует несколько методов измерения скорости воздушных потоков, каждый из которых может быть применен в любой из сфер. Все методы можно разделить по физической идее на пять групп [1]:

- а) Методы, основанные на использовании энергии потока:
  - 1) методы, использующие переменный перепад давлений,
  - 2) методы, использующие измерение крутящего момента,
  - 3) методы, использующие явление обтекания.
- б) Тепловые методы:
  - 1) методы, использующие измерение температуры нагретого тела, помещаемого в поток (термоанемометры),
  - 2) методы, использующие измерение температуры потока, нагреваемого нагревателем (теплокалориметры).
- в) Методы, основанные на введении в поток невесомой метки и измерении ее скорости:
  - 1) методы, использующие впрыскивание порции иного состава, цвета,
  - 2) методы, использующие намагничивание,
  - 3) методы, использующие ионизацию,
  - 4) методы, использующие подогрев,
  - 5) акустические (условно).
- г) Корреляционные методы.
- д) Оптические методы.

Наряду с популярными крыльчатými анемометрами и термоанемометрами, большую популярность завоевывают ультразвуковые. Их преимуществами являются:

- отсутствие трущихся и движущихся деталей конструкции, что исключает износ;
- высокая точность измерения;
- высокая чувствительность;
- независимость от внешних факторов среды.

Среди акустических анемометров в основном распространение получили приборы, в которых измеряется разность времен прохождения акустических колебаний по потоку и против него. Реже встречаются приборы, в которых акустические колебания направляются перпендикулярно к потоку и измеряется степень отклонения этих колебаний от первоначального направления.

На базе акустического анемометра возможно создание прибора для определения направления воздушного потока. Такой прибор выгодно отличается от флюгера, отсутствием механических вращающихся частей в конструкции.

В качестве первичных преобразователей должны использоваться ультразвуковые датчики, работающие в диапазоне ультразвука низких частот 15-100 кГц, т.к. звуковые волны именно таких частот имеют наименьшее затухание при перемещении в воздушной среде [2]. Для применения анемометра в уличных условиях на открытом воздухе УЗ датчики должны быть герметичны, иметь широкий диапазон рабочих температур и широкий угол направленности.

Предлагаемый акустический анемометр измеряет скорость воздушного потока на основе измерения времени распространения ультразвуковых импульсов через движущуюся воздушную массу. По разности между временами распространения импульсов в прямом и обратном направлениях относительно движения воздушного потока определяется его скорость.

Возбуждение ультразвуковых колебаний осуществляется первичными пьезоэлектрическими преобразователями (далее ПЭП).

ПЭП в паре работают попеременно в режиме приемник/излучатель и обеспечивают излучение в воздух и прием из него ультразвуковых импульсов. Устройство, которое формирует импульсы и измеряет времена распространения импульсов, образует вторичный преобразователь – электронный блок.

Устройство работает по следующему алгоритму: после подачи питания на схему устройства, происходит старт микроконтроллера, который составляет основу блока управления. Во время старта контроллера происходит инициализация его периферийных устройств: UART, таймера/счетчика, аналогового компаратора, портов ввода/вывода. Получив управляющий байт в UART от ПК начинается процесс формирования контроллером сигнала частотой 40 кГц, который поступает на вход передатчика, усиливается и проходит блок переключения, попадая на ПЭП-излучатель. С начала формирования сигнала запускается счетчик, который увеличивает свое значение на единицу с каждым тактом работы контроллера.

Преобразованный электрический сигнал в ультразвуковую волну перемещается в воздушной среде и достигает ПЭП-приемника. ПЭП выполняет обратное преобразование ультразвуковых импульсов в электрический сигнал, который, пройдя блок переключения, поступает на вход приемника, где усиливается, детектируется амплитудным детектором, фильтруется и поступает на вход аналогового компаратора. После того, как уровень детектированного сигнала превышает опорное напряжение компаратора, в микроконтроллере срабатывает аппаратное прерывание, обработчик которого останавливает счетчик. Значение, накопленное в счетчике, сохраняется в оперативной памяти контроллера в специальном буфере, а сам счетчик обнуляется. Сохранив значения счетчиков для всех пар датчиков, контроллер формирует посылку для передачи данных в последовательный порт.

Дальнейшая обработка данных происходит с использованием ПК. Скорость воздушного потока определяется по формуле:

$$v = \frac{x(t_2 - t_1)}{2t_1t_2},$$

где  $x$  – расстояние между парой ПЭП;

$v$  – скорость потока;

$t_1$  – время распространения ультразвуковой волны по потоку;

$t_2$  – время распространения ультразвуковой волны против потока.

Из формулы видно, что значение скорости потока зависит только от расстояния между парой ПЭП и временами распространения ультразвуковой волны в прямом и обратном направлении. При этом в расчете не участвует скорость распространения ультразвуковых волн в воздухе.

Для определения абсолютной погрешности измерения проекций вектора скорости на оси координат воспользуемся следующей формулой:

$$\Delta v = \sqrt{\left(\frac{t_2 - t_1}{2t_1 t_2} \Delta x\right)^2 + \left(\frac{x}{2t_1^2} \Delta t_1\right)^2 + \left(\frac{x}{2t_2^2} \Delta t_2\right)^2}$$

На рисунке 1 приведена зависимость относительной погрешности от скорости ветра при разных базах датчиков.

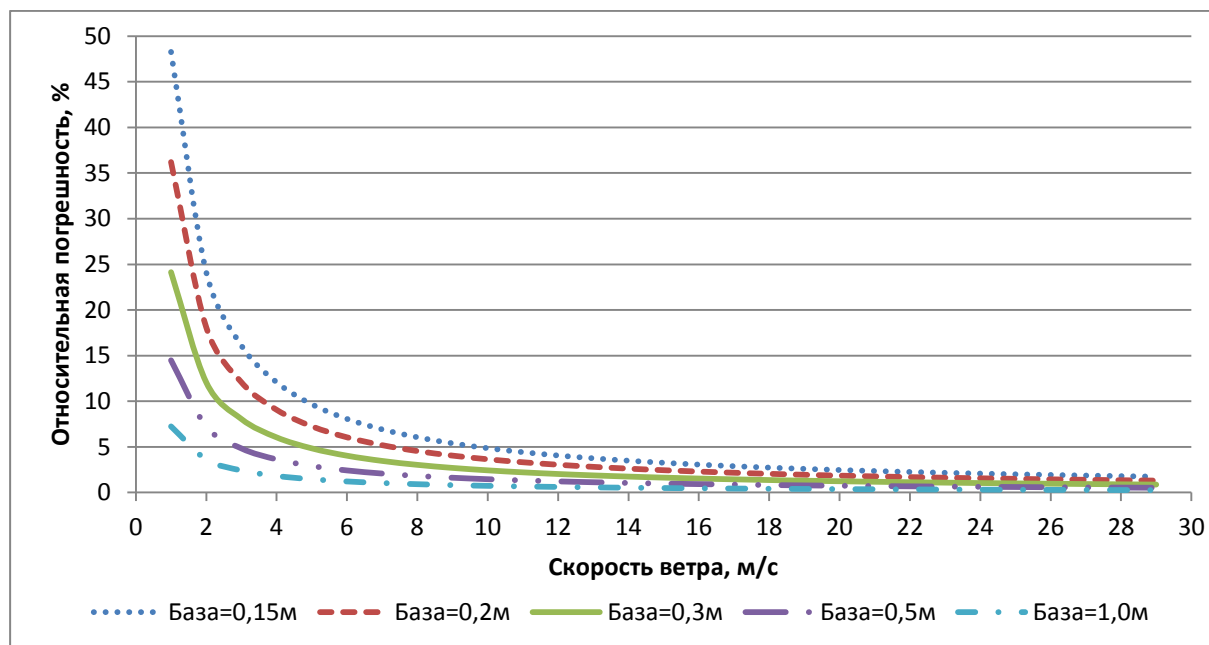


Рис. 1. График зависимости относительной погрешности от скорости ветра при разных базах датчиков.

Данный анемометр может использоваться на метеостанциях, в системах экологического мониторинга, в системах автоматического регулирования температуры помещения и др.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шкундин, С.З. Состояние и перспективы развития анемометрии в угольной промышленности. // sirsensor.ru URL: [http://www.sirsensor.ru/art\\_3.htm](http://www.sirsensor.ru/art_3.htm) (дата обращения 03.02.2012).
2. Красильников, В. А., Звуковые и ультразвуковые волны в воздухе, воде и твердых телах [Текст] // В. А. Красильников - М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. - 558с.

#### Сведения об авторах:

**Плотников А. Д.:** г. Барнаул, ООО «Исток-техно», гл. инженер, энергосбережение, автоматизация.

УДК

## К ВЫБОРУ ПОЛЕЗАДАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ (TO THE CHOISE OF FIELD-SPECIFIES SYSTEM)

К.С. Убониев  
K. Uboniev

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
E-mail: uboniev.kim@gmail.com

Показана возможность искусственного (виртуального) создания поля заданного направления, конфигурации и заданной напряженности или индукции в некотором ограниченном пространстве. Приведены несколько вариантов различных полезадающих систем, реализованных в лабораторных условиях. Также приведено сравнение результатов, полученных при моделировании полезадающих систем в различных средах.

(The possibility of artificial (virtual) field to create a given direction, given the configuration and intensity of induction or in a confined space. There are a few different options of field-specifies systems realized in the laboratory. Also, a comparison of results obtained in the simulation of field-specifies systems in different environments.)

### Ключевые слова:

Магнитное поле, полезадающая система, соленоид, катушка с током.

(The magnetic field, fieald-specifies system, a solenoid, coil with a current).

Магнитное поле — составляющая электромагнитного поля, появляющаяся при наличии изменяющегося во времени электрического поля. Кроме того, магнитное поле может создаваться током заряженных частиц, либо магнитными моментами электронов в атомах (постоянные магниты). С точки зрения квантовой теории поля электромагнитное взаимодействие переносится безмассовым бозон-фотоном (частицей, которую можно представить как квантовое возбуждение электромагнитного поля). Основной характеристикой магнитного поля является его сила, определяемая вектором магнитной индукции (вектор индукции магнитного поля). В СИ магнитная индукция измеряется в теслах (Тл), в системе СГС в гауссах.

Магнитное поле — это особый вид материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между движущимися заряженными частицами или телами, обладающими магнитным моментом.

Для воспроизведения и передачи значений единиц напряженности и индукции магнитного поля необходимы рабочие, образцовые меры и эталоны, а в целом ряде экспериментов нужно просто иметь источники магнитного поля. Необходимость в них возникает при разработке, конструировании различной аппаратуры, при поверке магнитоизмерительной аппаратуры, при исследовании магнитных свойств материалов и в физическом эксперименте. Во всех случаях приходится искусственно создавать поля заданного направления, конфигурации и заданной напряженности или индукции в некотором ограниченном пространстве.

Конструкции мер и источников напряженности или индукции магнитного поля в зависимости от их диапазона, требуемой степени однородности, могут существенно отличаться. Для создания относительно слабых магнитных полей с индукцией от  $10^{-8}$  до  $10^{-2}$  Тл (напряженность поля  $H$  будет соответственно равна от  $8 \cdot 10^{-3}$  до  $8 \cdot 10^3$  А/м) применяются отдельные катушки различных модификаций или системы, состоящие из нескольких катушек. Такие системы позволяют получать однородные магнитные поля в значительных объемах, что, в свою очередь, обеспечивает свободный доступ в рабочее пространство и позволяет размещать в нем объект исследования.

*Система из двух катушек с током. Магнитное поле двухконтурной системы катушек*

В ряде практических задач первостепенное значение имеет однородность магнитного поля, создаваемого системой контуров с током.



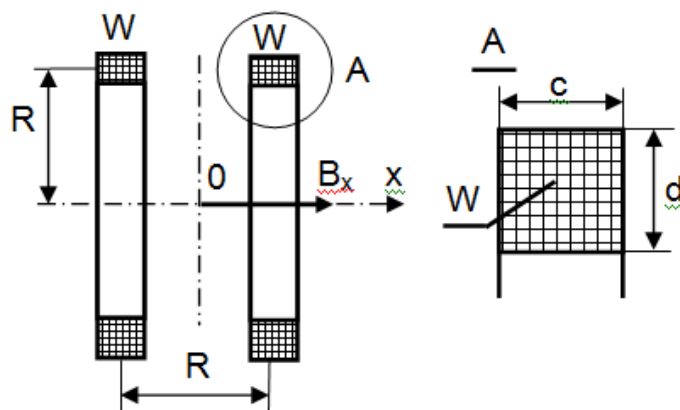


Рис. 1. Катушки Гельмгольца.

Для получения практически однородного магнитного поля используются Катушки Гельмгольца (рис. 1). В идеальном случае они представляют собой два одинаковых кольцевых витка, соединенных между собой последовательно и расположенных на расстоянии радиуса витка друг от друга. Обычно катушки Гельмгольца состоят из двух катушек, на которых намотано некоторое количество витков, причем толщина катушки должна быть много меньше их радиуса. В реальных системах толщина катушек может быть сравнима с их радиусом. Таким образом, можно считать системой колец Гельмгольца две соосно расположенных одинаковых катушки, расстояние между центрами которых приблизительно равно их среднему радиусу. В центре системы имеется зона однородного магнитного поля, что может быть использовано для измерительных целей, для калибровки датчиков магнитной индукции и т. д.

В пространстве между катушками, занимаемом воображаемым цилиндром с диаметром основания и образующей, равной  $0,2R$  и при выполнении условия  $c/d = \sqrt{31/36}$ , неоднородность поля не будет превышать 0,02%, а значение магнитной индукции будет равно

$$B_x = \frac{8\mu_0 WI}{5\sqrt{5}R} \left[ 1 - 0,144 \frac{1}{R^4} (8x^4 - 24x^2 y^2 + 3y^4) + \dots \right].$$

В центре системы ( $x=0, y=0$ )  $B_x = 0.7155 \frac{\mu_0 WI}{R}$ , Тл.

Данная система колец реализована в авторской программе «Helmholtz Coills V1.0». Интерфейс этой программы приведен ниже, на рисунке 2.

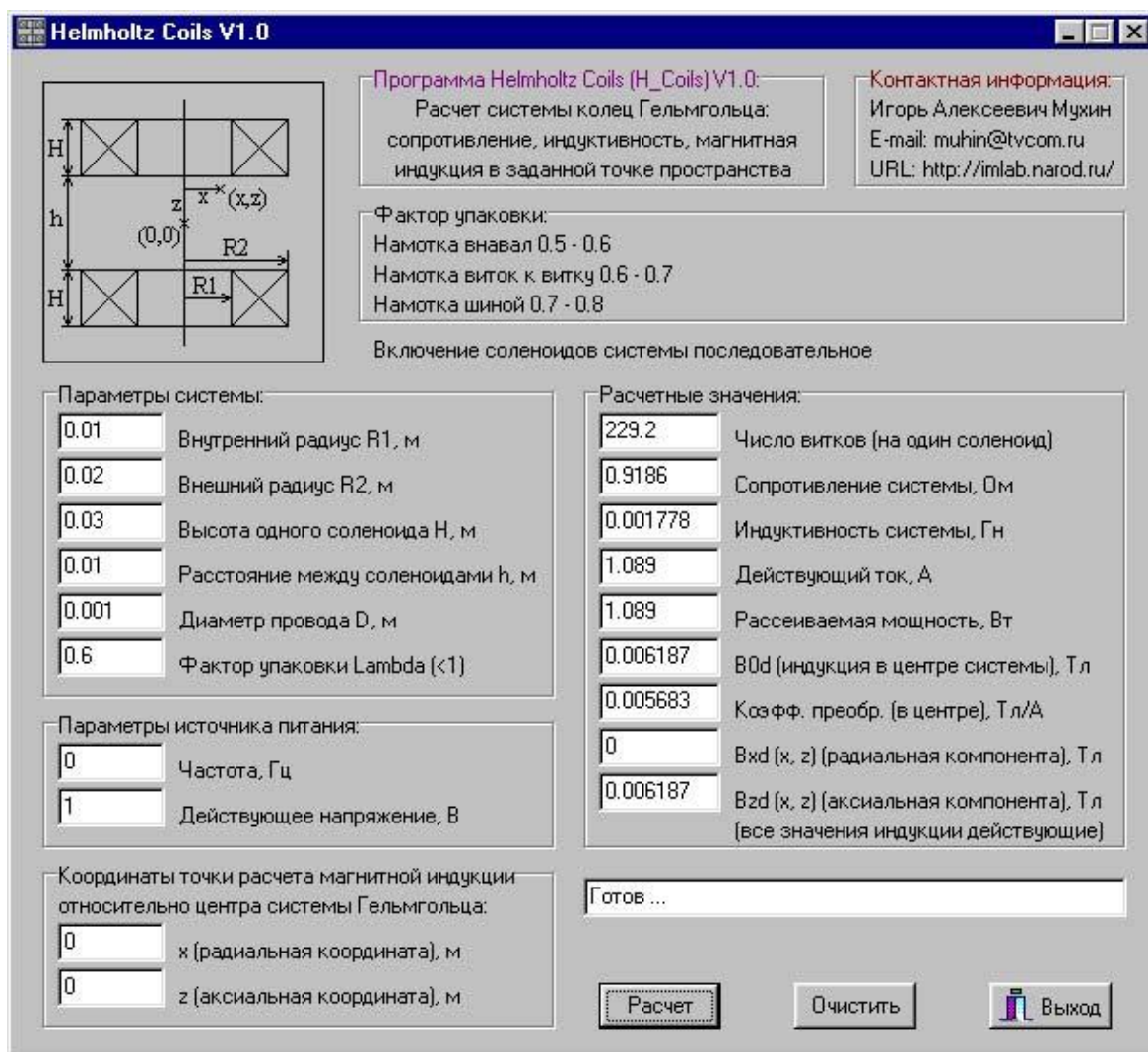


Рис. 2 Интерфейс программы.

Входные данные:

R1 - внутренний радиус соленоида системы, м

R2 - внешний радиус соленоида системы, м

H - высота одного соленоида, м

h - расстояние между соленоидами, м

D - диаметр обмоточного провода без изоляции (для проводов прямоугольного сечения производится пересчет по формуле  $D=(4s/p)1/2$ , где s - площадь поперечного сечения провода, м<sup>2</sup>), м

Lambda - фактор упаковки (отношение площади, занятой проводом в поперечном сечении соленоида без учета изоляции, к площади поперечного сечения соленоида) [7]

Частота приложенного напряжения, Гц

Действующее значение приложенного напряжения, В

x - радиус точки (относительно точки (0, 0)), в которой требуется рассчитать составляющие магнитной индукции, м

z - высота точки (относительно точки (0, 0)), в которой требуется рассчитать составляющие магнитной индукции, м

Выходные данные:

Число витков одного соленоида

Активное сопротивление системы (условия нормальные), Ом

Индуктивность системы, Гн

Действующее значение тока через систему, А  
 Рассеиваемая в системе мощность, Вт  
 $B_{0d}$  - магнитная индукция (действующее значение) в центре системы (точка (0, 0)), Тл  
 Коэффициент преобразования в центре системы (магнитная индукция в расчете на единицу действующего тока), Тл/А

$B_{xd}$  (x, z) - радиальная составляющая магнитной индукции (действующее значение) в точке с координатами (x, z) (относительно точки (0, 0)), Тл

$B_{zd}$  (x, z) - аксиальная составляющая магнитной индукции (действующее значение) в точке с координатами (x, z) (относительно точки (0, 0)), Тл

Данная программа позволяет рассчитывать по заданным геометрическим размерам системы колец Гельмгольца ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $H$ ,  $h$ ), диаметру провода  $D$  и фактору упаковки  $\Lambda$ : число витков одного соленоида системы, активное сопротивление системы (по меди), индуктивность системы, действующее значение тока в обмотках при заданном действующем напряжении и частоте источника питания, рассеиваемую при этом мощность, величину магнитной индукции ( $B_{xd}$ ,  $B_{zd}$ ) в заданной точке пространства (x, z), величину магнитной индукции  $B_0$  в центре системы (0, 0), а также коэффициент преобразования в центре системы. Расчеты производятся в системе СИ. Результаты выводятся на экран монитора.

Помимо приведенной выше программы, для создания системы из катушек Гельмгольца можно использовать пакет программ Labview.

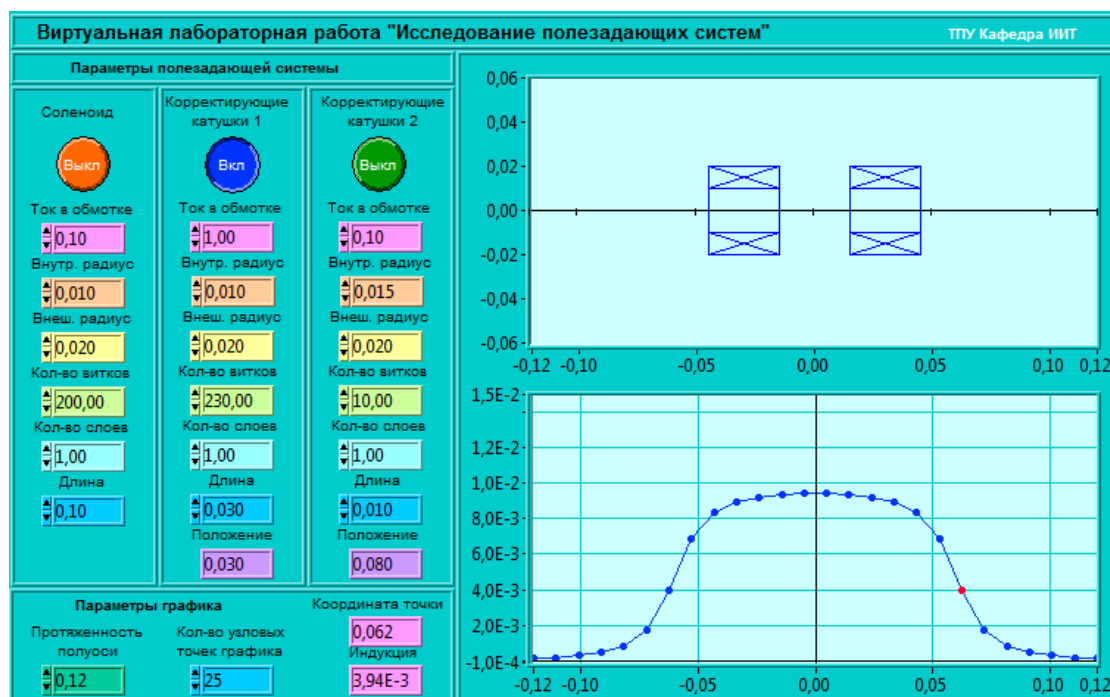


Рис. 3 Общий вид интерфейса виртуального макета.

В левой части окна программы расположены элементы управления и задания параметров – поле «Параметры ползущей системы»:

Кнопки «Вкл/Выкл» - для включения и выключения питания обмоток представленных в работе ползущих систем – соленоида и двух пар корректирующих катушек (1-1) и (2-2);

Регуляторы – индикаторы «Ток в обмотке» значений токов в обмотках соленоида и корректирующих катушек;

Регуляторы – индикаторы «Внутр. радиус» для установки значений внутреннего радиуса обмоток;

Регуляторы – индикаторы «Внешн. радиус» для установки значений внешнего радиуса обмоток;

Регуляторы – индикаторы «Кол-во витков» для установки количества витков в обмотках;

Регуляторы – индикаторы «Кол-во слоев» для установки числа слоев намотки катушек;

Регуляторы – индикаторы «Длина» для установки длины обмоток катушек;

Регуляторы – индикаторы «Положение» (только для пар корректирующих катушек) - показывает координаты «х» центров катушек относительно начала координат системы в целом.

В левой нижней части окна программы расположены элементы управления графиком распределения аксиальной (х-вой) составляющей индукции ползающей системы:

Регулятор – индикатор «Протяженность оси» для изменения диапазона вдоль оси системы, в котором рассчитываются и индицируются значения магнитной индукции;

Регулятор – индикатор «Кол-во узловых точек графика» - для выбора количества узловых точек графика распределения индукции магнитного поля;

Индикатор «Координата точки» - показывает координату выделенной курсором точки на кривой, отображающей распределение значений индукции магнитного поля вдоль оси системы;

Индикатор «Индукция» - показывает значение магнитной индукции в выделенной курсором точке наблюдения.

В правой части окна программы расположены два поля графической индикации – форма и расположение выбранных ползающих систем – поле объектов, используемых по отдельности или совместно, и график распределения аксиальной составляющей магнитной индукции вдоль оси системы.

Задавшись одними и теми же значениями входных параметров для обеих программ, было проведено сравнение результатов. Результаты значений, полученных в программе «Helmholtz Coil» приведены в таблице 1.

Таблица 1

|               |       |        |       |        |       |        |       |        |        |        |
|---------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|
| Коорд. точки  | -0,05 | -0,045 | -0,04 | -0,035 | -0,03 | -0,025 | -0,02 | -0,013 | -0,008 | -0,003 |
| Индукция, мТл | 7,25  | 8,06   | 8,55  | 8,84   | 9,02  | 9,19   | 9,24  | 9,29   | 9,35   | 9,36   |

|               |      |       |       |       |      |       |      |       |      |       |      |
|---------------|------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| Коорд. точки  | 0    | 0,003 | 0,008 | 0,013 | 0,02 | 0,025 | 0,03 | 0,035 | 0,04 | 0,045 | 0,05 |
| Индукция, мТл | 9,36 | 9,36  | 9,35  | 9,29  | 9,26 | 9,19  | 9,02 | 8,84  | 8,55 | 8,06  | 7,25 |

Ниже приведены графики зависимости индукции В от положения точки (рис 4). Слева график построенный в Mathcad на основе полученных значений в программе «Helmholtz Coil». Справа рисунок из виртуального макета Labview.

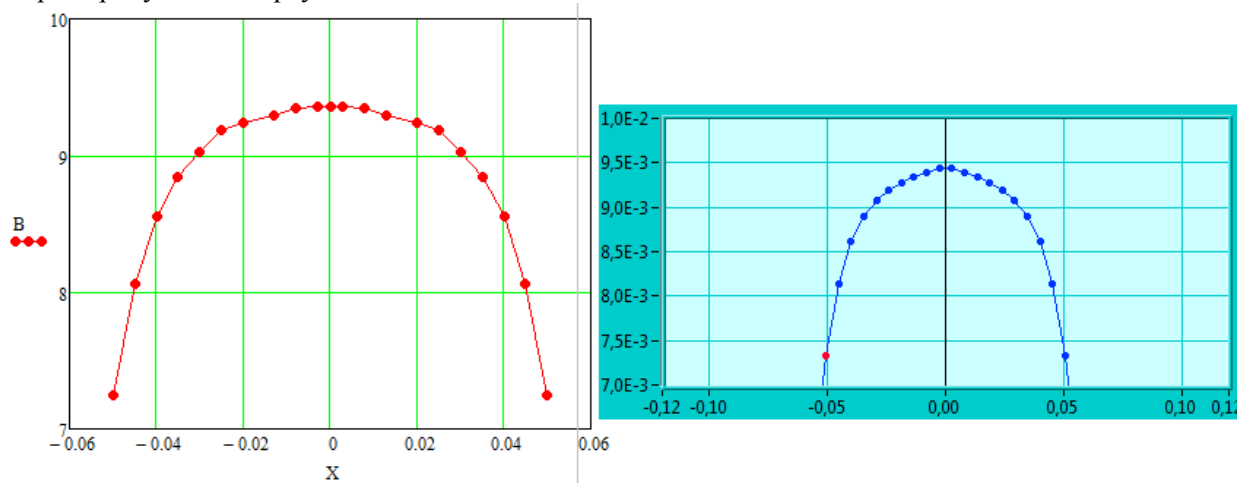


Рис. 4. Зависимость индукции от координаты.

*Однослойный соленоид с током. Магнитное поле однослойного соленоида с током.*

При создании магнитных полей большей напряженности широкое распространение получили *соленоиды* – катушки, длина которых для достижения однородности поля выбирается значительно больше диаметра сечения витка обмотки. Соленоидом называется цилиндрическая катушка с током, состоящая из относительно большого числа витков проволоки, которые образуют винтовую линию. Если витки расположены вплотную или очень близко друг к другу, то соленоид можно рассматривать как систему последовательно соединенных круговых токов одинакового радиуса с общей осью. Обмотка соленоида наносится на каркас из немагнитных материалов.

Применение соленоидов не всегда удобно, так как они не обеспечивают столь свободного доступа к области пространства, характеризующегося высокой степенью однородности поля. В то же время интенсивность поля, создаваемого соленоидом, может значительно превышать поле, создаваемое ранее рассмотренными системами, при значительно меньших размерах его по сравнению с размерами систем круговых токов. Поэтому соленоиды применяются в основном в тех случаях, когда необходимо создать достаточно интенсивное поле, а размеры устройства, создающего это поле, ограничены.

Соленоиды целесообразно использовать и в тех случаях, когда необходимо иметь достаточно однородное поле на большом участке вблизи его оси.

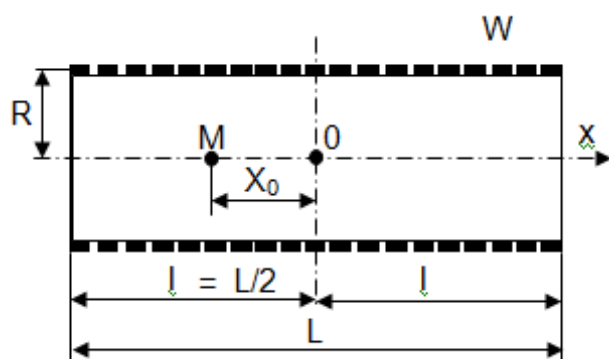


Рис. 5. Соленоид.

Значение магнитной индукции поля в любой точке M, лежащей на оси x однослойного соленоида (Рис.5), равно алгебраической сумме индукций магнитного поля, создаваемых в точке M всеми витками.

Если число витков соленоида равно W, а ток в нем I, то индукция поля в любой точке наблюдения, лежащей на оси соленоида можно рассчитать как

$$B_x = \frac{\mu_0 W I}{2L} \left[ \frac{(l - x_0)}{\sqrt{R^2 + (l - x_0)^2}} + \frac{(l + x_0)}{\sqrt{R^2 + (l + x_0)^2}} \right],$$

а при  $x_0=0$ , т.е. в центре соленоида  $B_x = \frac{\mu_0 W I}{L} \frac{l}{\sqrt{R^2 + l^2}}$ .

Для расчета параметров и магнитного поля цилиндрического соленоида можно использовать программу «Coil». Интерфейс программы приведен ниже на рисунке 6.

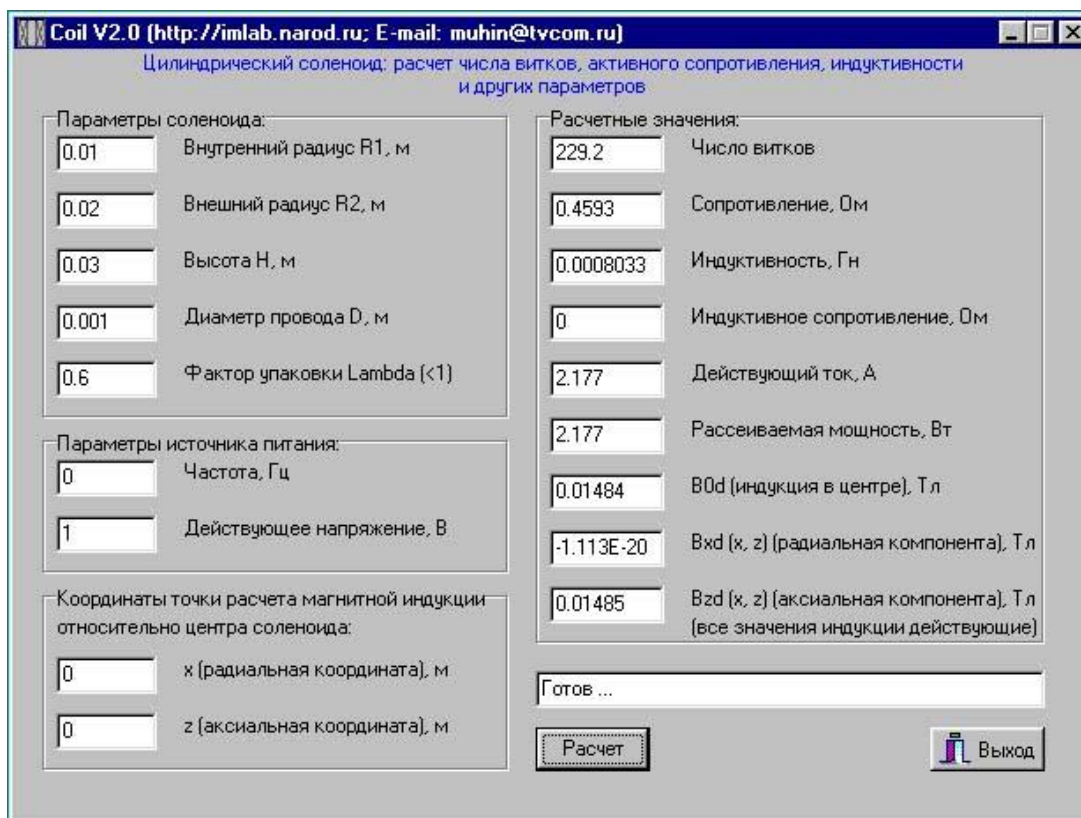


Рис. 6. Интерфейс программы "Coil".

Программа Coil позволяет рассчитывать по заданным геометрическим размерам ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $H$ ), диаметру провода  $D$  и фактору упаковки  $\Lambda$ : активное сопротивление  $R$  (по меди), индуктивность  $L$ , число витков  $N$ , величину тока  $I_d$  в обмотке при заданном напряжении  $E_d$  заданной частоты  $f$ , рассеиваемую при этом мощность  $P$ , реактивное сопротивление  $Z_L$ , величину магнитной индукции ( $B_{xd}$ ,  $B_{zd}$ ) в заданной точке пространства ( $x$ ,  $z$ ), величину магнитной индукции  $B_0$  в центре соленоида ( $0$ ,  $0$ ). Расчеты производятся в системе СИ

Упомянутый ранее виртуальный макет, созданный в Labview также может быть использован для создания системы с соленоидом.

Задавшись одними и теми же значениями входных параметров для обеих программ, было проведено сравнение результатов. Результаты значений, полученных в программе «Coil» приведены в таблице 2.

Таблица 2

| Координата точки       | -0,1 | -0,08 | -0,06 | -0,04 | -0,02 | 0    | 0,02 | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,1 |
|------------------------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|-----|
| Значение индукции, мТл | 1,2  | 2,21  | 2,41  | 2,44  | 2,45  | 2,45 | 2,45 | 2,44 | 2,41 | 2,21 | 1,2 |

Ниже приведены графики зависимости индукции  $B$  от положения точки (рис 7). Слева график построенный в Mathcad на основе полученных значений в программе «Coil». Справа рисунок из виртуального макета Labview.

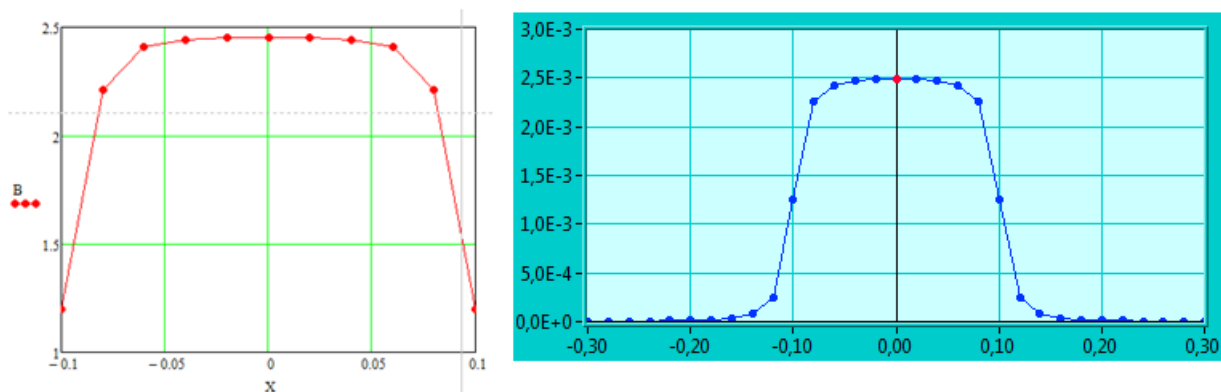


Рис. 7. Зависимость индукции от координаты.

Анализируя полученные значения магнитной индукции поля, создаваемого соленоидом, можно видеть, что поле вдоль его оси сравнительно быстро изменяется, приводя тем самым к значительной степени неоднородности. Попытки улучшить степень однородности X-й компоненты поля вдоль его оси привели к приданию соленоиду такой формы, которая бы обеспечивала меньшую зависимость  $B$  от расстояния, либо компенсации изменения  $B$  путем включения дополнительных компенсационных катушек, как правило, на краях соленоида, улучшающих степень однородности этой компоненты. При этом заданная степень однородности на заданном участке оси может быть получена при меньшей общей длине соленоида. Такая система может быть также реализована в пакете Labview.

Из проведенных экспериментов можно сделать вывод, что выбор ползающей системы необходимо делать на основании заданных условий. В системе «Пара катушек с током» значение индукции поля несколько меньше чем в системе «Соленоид», также и полученное поле является однородным на меньшем участке. Однако использование соленоида не всегда удобно из-за отсутствия доступа к области пространства, характеризующегося высокой степенью однородности поля.

Рассмотренные ранее ползающие системы являются наиболее простыми для исполнения и использования. Также в лабораторных условиях для получения более сильных полей могут быть использованы электромагниты с воздушным зазором. В настоящее время, на основании проведенных экспериментов и расчетов, ведутся разработки программы, подобной предложенным в статье, для систем, состоящих из электромагнитов с зазором.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Штамбергер Г.А. Устройства для создания слабых магнитных полей. – Новосибирск: Наука – Сибирское отд., 1972. – 175 с.
2. Мухин И.А. Системы колец Гельмгольца (катушки Гельмгольца) // Лаборатория независимых исследований. 2009. URL: [http://imlab.narod.ru/M\\_Fields/H\\_Coils/H\\_Coils.htm](http://imlab.narod.ru/M_Fields/H_Coils/H_Coils.htm) (дата обращения: 25.04.2012).
3. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. – М.: Оникс 21 век, 2005.
4. Магнетизм для всех // URL: [http://www.scientific.ru/journal/translations/magn\\_ed.html](http://www.scientific.ru/journal/translations/magn_ed.html) (дата обращения: 25.04.2012).

### Сведения об авторах:

Убониев К.С.: г.Томск, магистр ТПУ, гр. 1М401.

УДК

**АНАЛИЗ ПСИХОЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА С  
ПОМОЩЬЮ АППАРАТУРЫ НА МЕДИЦИНСКИХ НАНОЭЛЕКТРОДАХ  
(PSYCHO EMOTIONAL STATE ANALYSIS OF THE PERSON WITH EQUIPMENT  
ON MEDICAL NANOELECTRODES)**

А.В. Чистякова, И.В. Кашуба  
A.V. Chistyakova, I.V. Kashuba

Национальный исследовательский Томский Политехнический университет  
Email: lingyue@yandex.ru

**Аннотация**  
(Аннотация на английском языке)

**Ключевые слова:**

Психоэмоциональное состояние, наноэлектроды.  
(Psycho emotional state, nanoelectrodes.)

Здоровье является одним из ключевых факторов человеческого благополучия. Сегодня общеизвестно, что многие болезни имеют своим первоисточником стресс. Приборы для анализа психоэмоционального состояния человека помогают определить наличие стрессового состояния, что, в свою очередь, может помочь предупредить порождаемую стрессом болезнь.

Анализ психоэмоционального состояния может быть проведен с помощью пяти методов: электроэнцефалограммы, электрокардиограммы, электромиограммы, электроокулограммы и кожно-гальванической реакции.

1. Электрокардиограмма (ЭКГ) — графическое представление разности потенциалов, возникающих в результате работы сердца и проводящихся на поверхность тела. На ЭКГ отражается усреднение всех векторов потенциалов действия, возникающих в определённый момент работы сердца. При заболеваниях сердца в одном или нескольких отведениях могут обнаруживаться отклонения от нормальной формы ЭКГ, и это существенно помогает при постановке диагноза.

2. Электроэнцефалограмма (ЭЭГ) — график электрической активности головного мозга, получаемый в процессе электроэнцефалографии. Позволяет узнать о состоянии и деятельности мозга, о наличии и отсутствии патологических очагов и процессов. ЭЭГ также незаменима для контроля за состоянием центральной нервной системы. Например, тэта-ритм тесно связан с эмоциональным и умственным напряжением. Его иногда так и называют стресс-ритм или ритм напряжения. У человека одним из ЭЭГ симптомов эмоционального возбуждения служит усиление тэта-ритма, сопровождающее переживание как положительных, так и отрицательных эмоций. При выполнении мыслительных заданий может усиливаться и дельта-, и тета-активность. Причем усиление последней составляющей положительно соотносится с успешностью решения задач.

3. Метод кожно-гальванической реакции – это регистрация электрокожного потенциала (как правило, на ладони). Электрическая активность кожи связана главным образом с активностью потовых желез, изменяющих ее сопротивление и находящихся под контролем вегетативной нервной системы. КГР чрезвычайно чувствительна к эмоциональному реагированию, состоянию тревоги, напряженности и часто используется для характеристики психоэмоционального состояния человека.

4. Электромиограмма - это регистрация электрических процессов в мышцах, фактически это запись потенциалов действия мышечных волокон, которые заставляют ее сокращаться. Регистрация ЭМГ позволяет выявить намерение начать движение за несколько секунд до его реального начала. Помимо этого миограмма выступает как индикатор мышечного напряжения. Например, когда человек испытывает сильные эмоции, он напряжен, когда он спокоен или устал – его мышцы расслаблены.



5. Электроокулограмма – графическая запись разности потенциалов, возникающей при изменении движения глаза. У человека передний полюс глаза электрически положителен, а задний отрицателен, поэтому существует разность потенциалов между дном глаза и роговицей, которую можно измерить. При повороте глаза положение полюсов меняется, возникающая при этом разность потенциалов характеризует направление, амплитуду и скорость движения глаза.

В лаборатории медицинского приборостроения Томского политехнического университета разработан аппаратно-программный комплекс для анализа психоэмоционального состояния человека на медицинских наноэлектродах, использующий все пять методов.

Для съема используются наноэлектроды. В технологии изготовления электродов были использованы наночастицы серебра размером не более 100 нм. Показано, что в наноэлектродах увеличивается объем керамической диафрагмы, заполненной наночастицами серебра, благодаря специальной технологии имплантации наночастиц в поры керамической диафрагмы, что приводит к значительному увеличению количества наноэлектродов в порах керамической диафрагмы.

С увеличением числа наноэлектродов значительно уменьшился уровень собственных шумов электродов, который составил единицы и десятки нановольт в зависимости от частотного диапазона. Наноэлектроды практически не поляризуются при токах до 0,5 мкА и имеют низкие контактные потенциалы. Также при их использовании в течение нескольких минут дрейф изолинии при токе в 1 нА составляет не более 0,001 мкВ/с; при токе в 100 нА – не более 0,01 мкВ/с. Данные преимущества позволяют получить более чувствительный прибор и, как следствие, более точную диагностику.

Рассмотрим подробнее типы используемых электродов.



Рис. 1. Наноэлектроды ЭСК-03/н1.

Наноэлектроды ЭСК-03/н1 – грудной и конечностный электроды, которые фиксируются на груди и конечностях с помощью резинового пояса и ремней. Наноэлектрод ЭСК-03/н1 создан на основе чувствительного элемента Ø20,1мм.



Рис 2. Наноэлектроды ЭСЭГ-1/н2 для целей электроэнцефалографии.



Рис 3. Наноэлектроды с кнопочным отведением ЭСМГ-1/н1 для целей электромиографии, электроокулографии.



Рис 4. Нанoeлектроды с кнопочным отведением ЭСМГ-1/н3 для электромиографии, электрокардиографии и измерения кожно-гальванической реакции.

Существует множество методов наложения электродов в зависимости от целей их использования и от вида самих электродов.

При снятии сигнала ЭКГ для анализа психоэмоционального состояния применяется стандартный либо метод Холтера.

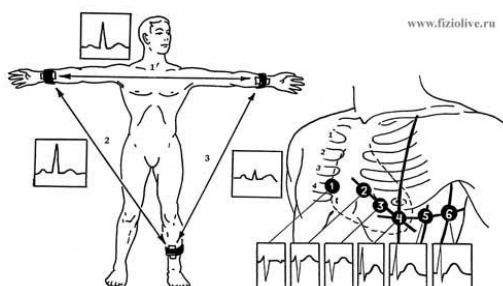


Рис 5. Схема наложения электродов при стандартных (а) и холтеровских (б) отведениях электрокардиограммы и ЭКГ, полученные при этих отведениях

Электроды могут располагаться на различном расстоянии от сердца, в том числе и на конечностях и грудные (они обозначаются символом V).

Стандартные отведения от конечностей: первое (I) отведение (правая рука — ПР, левая рука — ЛР); второе (II) отведение (ПР и левая нога — ЛН) и третье (III) отведение (ЛР—ЛН). На правую ногу крепится земля.

Грудные отведения по Холтеру. Для снятия ЭКГ активный электрод накладывают на различные точки грудной клетки, обозначаемые цифрами (V1, V2, V3, V4, V5, V6). Эти отведения отражают электрические процессы в более или менее локализованных участках и помогают выявлять ряд сердечных заболеваний.

Для снятия сигнала ЭЭГ используется система «10—20%» — стандартная система размещения электродов на поверхности головы.

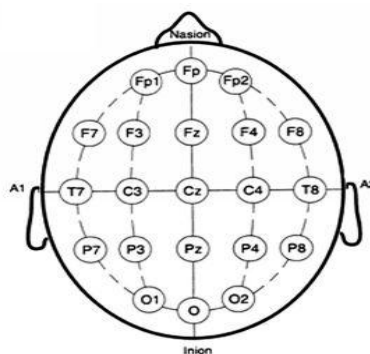


Рис 6. Расположение электродов по системе 10-20%.

Место расположения электродов определяется следующим образом: линия, соединяющая переносицу (назион) и затылочный бугор (инион), делится на 10 равных отрезков. Первый и последний электроды накладываются на расстоянии, соответствующем 10 % общей длины линии, от иниона или назиона. От первого электрода на расстоянии, соответствующем 20 % общей длины линии, накладывается другой электрод и т. Д. Земля крепится на лоб.

Всего при наложении можно использовать от 3 до 21 электродов.

При снятии сигнала КГР электроды накладываются на указательный и безымянный пальцы правой руки, на средний палец накладывается земля.

При снятии сигнала ЭМГ электроды крепятся на коже выше запястий на тыльной стороне руки.

При снятии ЭОГ два электрода крепятся на внутреннем и наружном уголке глаза. Земля крепится на лбу.

Для управления комплексом используется программное обеспечение, разработанное специально для данного комплекса. Она представляет собой исполняемый модуль «ADC1k.exe», выполняющий следующие задачи: обеспечение интерфейса пользователя; управление аппаратной частью комплекса; получение, первичная обработка и визуализация биомедицинских данных в виде графиков; управление хранением данных.

Ход эксперимента.

Следует заметить, что в данный момент прибор находится на стадии тестирования. Хотя прибор является пятиканальным, пока проведены эксперименты только на трех каналах, т.к. в этом случае легче проводить доработки прибора и его программного обеспечения.

В ходе экспериментов применялись различные комбинации пяти каналов: ЭКГ, ЭЭГ, КГР, ЭМГ, ЭОГ. Рассмотрим подробнее эксперимент с использованием каналов ЭКГ, ЭЭГ, КГР.

Перед проведением эксперимента проверяется степень заряженности прибора, т.к. он работает на аккумуляторах, и записывается шум, пока без наложения электродов, чтобы убедиться в том, что прибор работает правильно.

После этого проводится наложение электродов. Электроды различных типов накладываются по специальным схемам, креплением служат клейкие полоски. Для лучшей проводимости сигнала на участке электрод-кожа используется электролит.

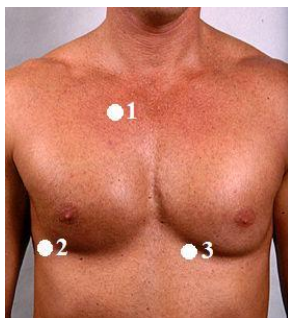


Рис 7. Крепление электродов для снятия ЭКГ (1 – минус, 2 – земля, 3 – плюс).

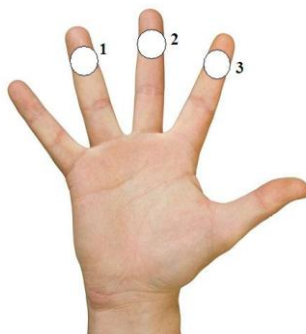


Рис 8. Крепление электродов для снятия КГР (1 – плюс, 2 – земля, 3 – минус).



Рис 9. Крепление электродов для снятия ЭЭГ (1 – земля).

При одновременном снятии сигнала со всех каналов возможно объединить землю в системе электродов ЭКГ и КГР. Общая земля будет находиться в системе электродов ЭКГ.

В ходе записи сигналов испытуемый ответил на ряд вопросов с целью установления зависимости уровня тревожности, вызываемой вопросом, и степени изменений, вносимых при этом в сигналы ЭКГ, ЭЭГ и КГР. Вопросник содержал как нейтральные вопросы типа: «Вы студент?», так и «тревожные» вопросы: «Бойтесь ли Вы темноты?».

Обработка полученных сигналов производится в программе Students Health.

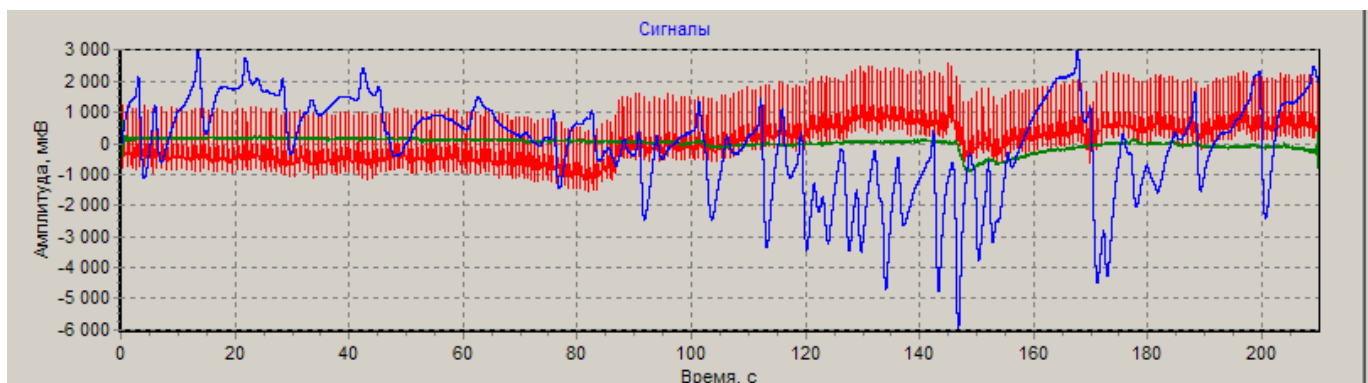


Рис. 10. Общая запись сигналов ЭКГ (красный), ЭЭГ (зеленый), КГР (синий).

На рис. 10 можно наблюдать довольно сильные колебания сигнала КГР (синий). Это связано с волнением испытуемого при ответе на вопросы. По увеличению амплитуды колебаний можно судить о степени испытываемого человеком стресса. Нейтральные вопросы вызвали незначительные колебания кривой КГР или не вызвали их вообще, в отличие от «тревожных вопросов», вызвавших самые сильные колебаний – до единиц мВ.

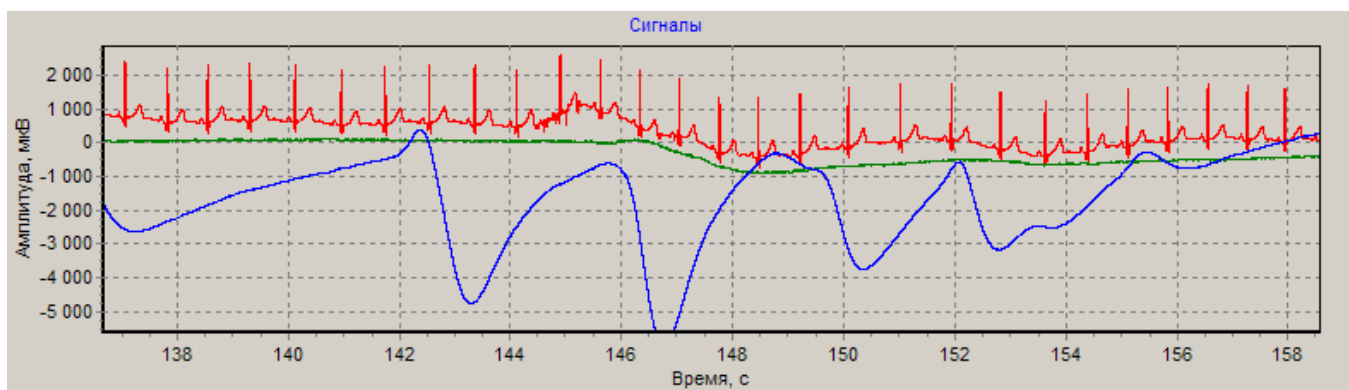


Рис. 11. Взаимозависимость изменения сигналов.

На рис. 11 видно, что изменения психоэмоционального состояния влекут за собой изменения всех сигналов. Начиная с 145 секунды происходит попеременное учащение и

урежение ритмов ЭКГ (красный), что сопровождается также изменением ЭЭГ (зеленый) и КГР (синий). Это говорит о том, что воздействие на психоэмоциональную сферу человека влечет за собой довольно значительные физиологические отклики во всем организме, в данном случае это изменение мозговой активности, сердечного ритма и электропотенциала кожи. Не слишком заметные изменения сигнала ЭЭГ (рис. 11) становятся более очевидными при его отдельном рассмотрении (рис. 12) – на 145 секунде происходит ярко выраженный скачок сигнала.



Рис. 12. Сигнал ЭЭГ

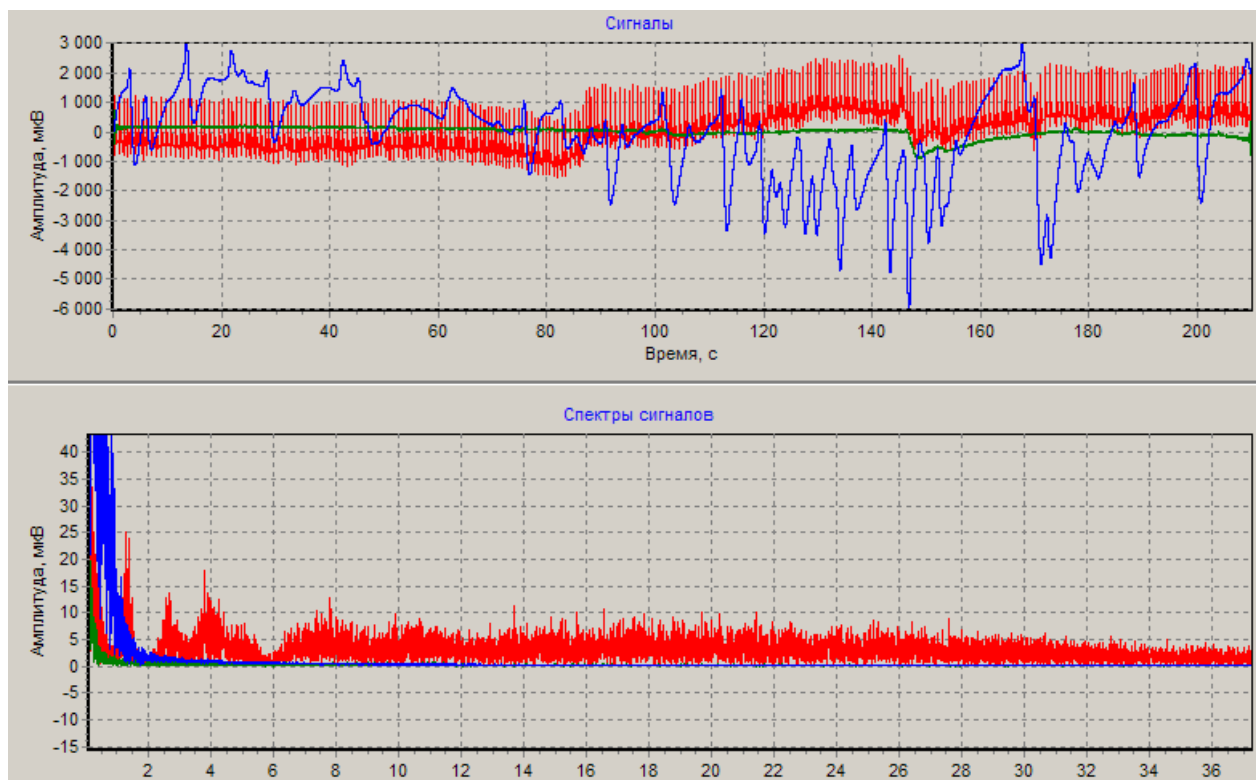


Рис. 13. Спектры сигналов ЭКГ, ЭЭГ, КГР

С помощью программы Students Health можно исследовать так же спектр сигнала (рис. 13).

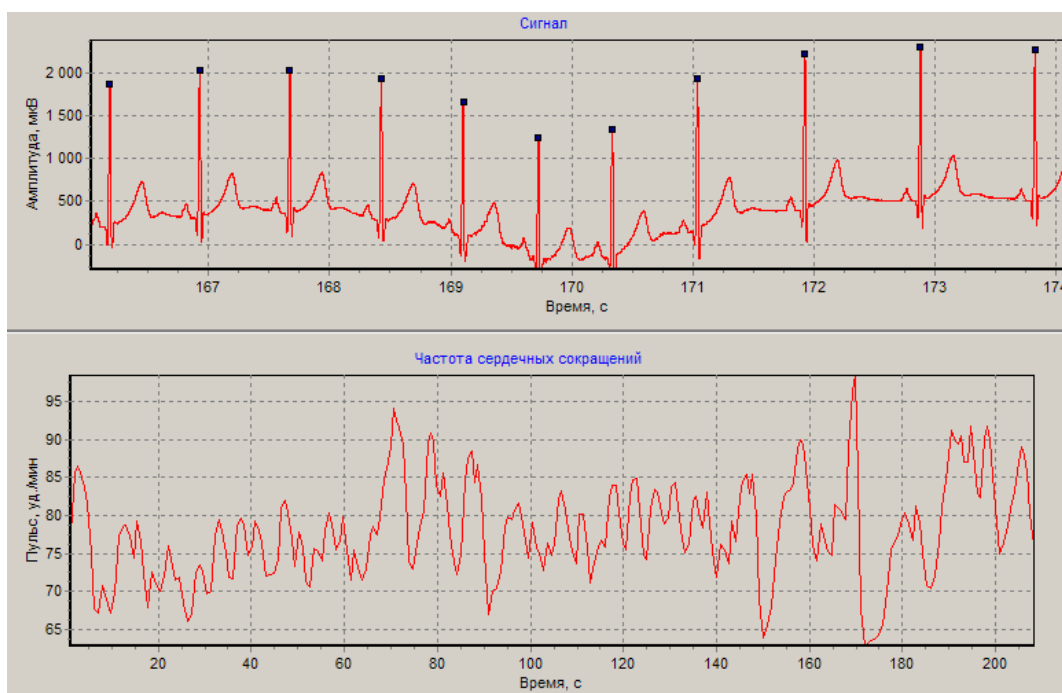


Рис. 14. Частота сердечных сокращений

Также возможно автоматически отследить частоту сердечных сокращений, что существенно облегчает исследование кривой ЭКГ. На рис. 14 видно, что наибольшая частота сердечных сокращений наблюдалась примерно на 170 секунде. Если обратиться к рис. 10, можно заметить, что именно на это же время приходится и самое большое по амплитуде изменение КГР. Это момент наибольшего психоэмоционального всплеска испытуемого, нашедшего отражение в изменении его физиологических реакций.

Итак, в ходе эксперимента были сделаны следующие выводы:

1. изменение психоэмоционального состояния действительно находится в тесной взаимосвязи с физическим состоянием человека,
2. аппаратно-программный комплекс позволяет успешно и без искажений снять сигнал с тела испытуемого, записать его и представить в удобной для анализа форме,
3. возможности ПО позволяют проанализировать такие характеристики сигнала как форма сигнала, спектр сигнала, ЧСС, провести БПФ и т.д.

В дальнейшем планируется провести измерения сразу на пяти каналах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вассерман Л.И., Дюк В.А., Иовлев Б.В., Червинская К.Р. Психологическая диагностика и новые информационные технологии. Санкт-Петербург. 1997.—203с.
2. Иовлев А.Б., Иовлев Б.В., Червинская К.Р. Об автоматизации психодиагностических исследований. Тр./НИИ им. В.М. Бехтерева.—Л., 1995.—189с.
3. Калакутский Л. И., Манелис Э.С. Аппаратура и методы клинического мониторинга / Учебное пособие – М.: Высшая школа, 2004. - 156 с.

#### Сведения об авторах:

**Чистякова А.В.:** г.Томск, магистр ТПУ, гр. 1М401.

**Кашуба И.В.:** г.Томск, студент ТПУ, гр. 1БМ12.

УДК 620.179.1.082.7.05

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ  
ЦЕЛОСТНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОЕМКОСТНЫМ  
МЕТОДОМ  
(RESEARCHING OF THE POSSIBILITY OF PROCESS CONTROL INSULATION  
QUALITY OF CABLE PRODUCTS WITH ELECTROCAPACITY METHOD)**

Н.С. Старикова, В.В. Редько  
N. Starikova, V. Red'ko

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
E-mail: nadushasns@sibmail.com

Проведена оценка возможность работы установки для контроля целостности изоляции на этапе производства кабельных изделий, сочетающей электроискровой контроль и контроль емкости и/или угла диэлектрических потерь.

(It is estimated ability of work the system for monitoring of insulation quality, consist of electrospark control and control of capacity and / or dielectric losses during cable manufacturing.)

**Ключевые слова:**

Дефекты изоляции, электроискровой контроля, контроль емкости изоляции  
(Flaw of insulation, electrospark control, control of insulation capacity.)

На сегодняшний день, кабельное производство является одной из наиболее развивающихся отраслей промышленности, что объясняется современными мировыми тенденциями – компьютеризацией и автоматизацией. Основным требованием к кабельной продукции является высокое качество изделий, которое обеспечивается различными параметрами. Состояние изоляции кабеля является одним из важнейших параметров, требующих контроля. Наличие дефектов в изоляции приводит к нарушению работы кабеля, т.е. является причиной брака. В данной работе будут рассмотрены возможности определения дефектов изоляции с помощью электроемкостного метода контроля.

Электроемкостной метод контроля является сочетанием двух методов: электроискрового контроля и контроля емкости и/или угла диэлектрических потерь. Для упрощения поставленной цели, далее эти методы будут рассмотрены отдельно.

1. Электроискровой контроль.

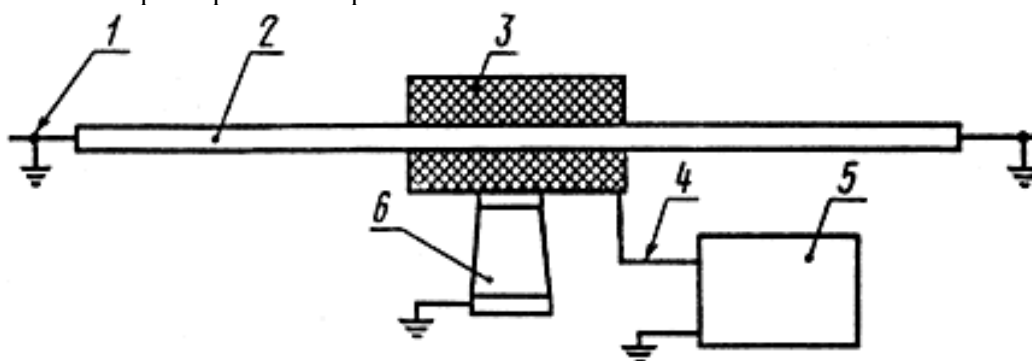


Рис. 8. Общая схема испытания «на проход»: 1 - токопроводящая жила или металлический покров кабельного изделия;  
2 - изоляция, оболочка или защитный шланг;  
3 - электрод; 4 - высоковольтный вывод;  
5 - установка; 6 – изолятор.

К испытываемому изделию подключают высокое напряжение с помощью электродов (синусоидальное, импульсное или постоянное). При прохождении дефекта через место приложения испытательного напряжения происходит пробой изоляции [1].

Процесс пробоя кабеля с инородными включениями рассмотрен на примере пробоя двухслойного конденсатора (Рис. 2).

Пусть  $\varepsilon_1, \gamma_1, d_1$  - соответственно диэлектрическая проницаемость, электропроводность и толщина первого слоя. Соответствующие величины с индексом 2 относятся ко второму слою. Если приложить к такой системе напряжение  $U$ , напряженность электрического поля в отдельных слоях будет отличаться от среднего значения:

$$E_{cp} = \frac{U}{d} [2].$$

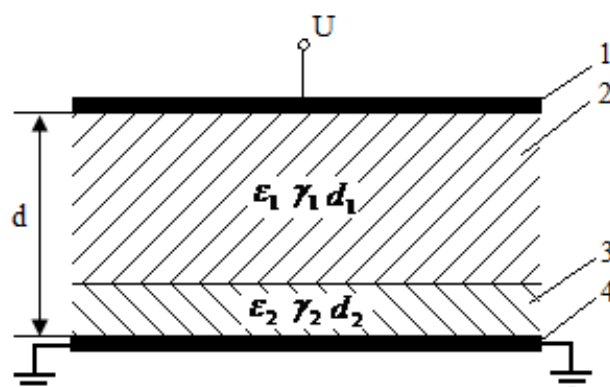


Рис. 9. Модель кабеля с инородным включением:  
1 – электрод (обкладка конденсатора); 2 – изоляция;  
3 – инородное включение; 4 – жила кабеля.

Напряженность поля в первом и во втором слоях:

$$E_1 = \frac{\gamma_2 d}{\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1} E_{cp} \quad (1)$$

$$E_2 = \frac{\gamma_1 d}{\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1} E_{cp} \quad (2)$$

$$E_2 = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} E_1$$

Напряжение  $E_2$ , например, может, превышая  $E_{cp}$ , достичь значения  $E_{2np}$  пробивной напряженности второго слоя. При этом произойдет пробой этого слоя, хотя  $E_{cp} < E_{2np}$ . Это вызовет, во-первых, уменьшение общей толщины изоляционного материала, что приведет к повышению  $E_1$ , и, во-вторых, поле во втором слое резко исказится, что понизит пробивное напряжение первого слоя. Поэтому пробой одного слоя может пробой всего образца в целом [2]. Для определения возможности происхождения пробоя необходимо также учитывать явление частичных разрядов, возникающих в воздушных полостях изоляции.



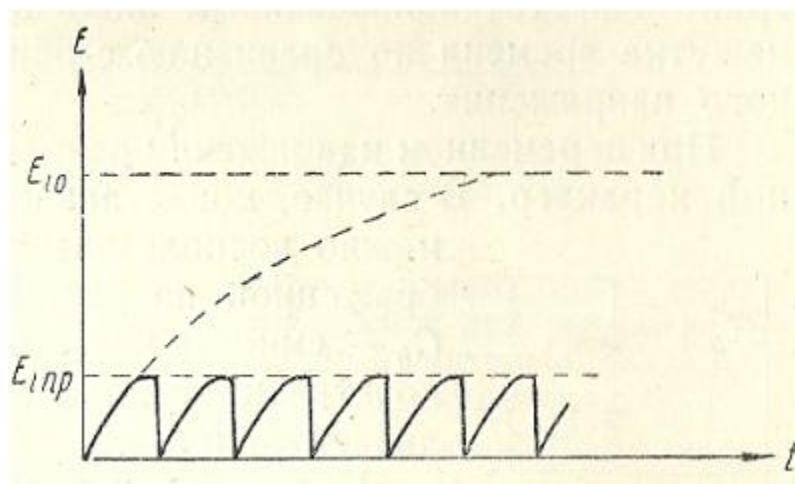


Рис. 10. Разряды в порах диэлектрика при постоянном напряжении.

При подаче постоянного напряжения разряды в порах будут носить пилообразный характер (Рис. 3), так как напряженность поля в поре будет возрастать по закону

$$E_i = E_{i0} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (3)$$

пока не достигнет значения  $E_{iпр}$ ; в момент пробоя  $E_i$  будет падать почти до нуля и снова возрастать согласно (3) [2].

Тогда формулы (1) и (2), с учетом явления частичных разрядов, будут иметь вид:

$$E_{1i} = \frac{U - d_2 E_2 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)}{d_1}$$

$$E_{2i} = E_2 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right),$$

где  $\tau$  – время заряда воздушной полости. Причем данные формулы отражают напряженность поля только во время заряда поры.

Виды дефектов, определяемые данным методом контроля:

- локальное уменьшение наружного диаметра кабеля (утонение);
- внутренние воздушные полости или включения;
- трещины на поверхности изоляции.

С учетом того, что контроль проводится при напряжениях близких к напряженности пробоя диэлектрика ( $k_U=1,5..2$ ), соотношение  $\varepsilon_r/\varepsilon_0$ , как правило, находится в пределах 2,5..6, а электрическая прочность дефекта кратно ниже электрической прочности изоляции, то при контроле напряжением в области дефекта будут происходить электрические разряды высокой интенсивности и область дефекта будет обладать высокой проводимостью. В этом случае всё испытательное напряжение будет приложено к целому участку изоляции  $d_1$ .

Для примера рассчитана минимальная толщина дефекта изоляции провода НВ1-0,2, регистрируемая данным методом, причем вид дефекта: утонение, воздушная полость, трещина, в данном случае важной роли не играет.

Для провода НВ1-0,2 с диаметром жилы  $d_{жс}=0,6$  мм и с наружным диаметром  $D=1,3$  мм: если толщина изоляции будет меньше 0,23мм (или внешний диаметр провода меньше 1,06мм) произойдет тепловой пробой изоляции, т.е. минимальная толщина изоляции дефекта, который может быть выявлен данным методом:

$$d_1 \leq \frac{d}{k_U},$$

где  $k_U$  - отношение значения напряжения пробоя диэлектрика к значению испытательного напряжения.

Недостатком метода является невозможность определения локального утолщения наружного диаметра кабеля из-за увеличения изоляционной прочности в месте дефекта. Также высоковольтные испытания не эффективны при обнаружении дефектов малой толщины (при любых значениях двух других размеров дефекта).

2. Контроль емкости и/или угла диэлектрических потерь.

Виды дефектов, определяемые данным методом контроля:

- локальное уменьшение наружного диаметра кабеля (утонение и утолщение);
- внутренние воздушные полости или включения.

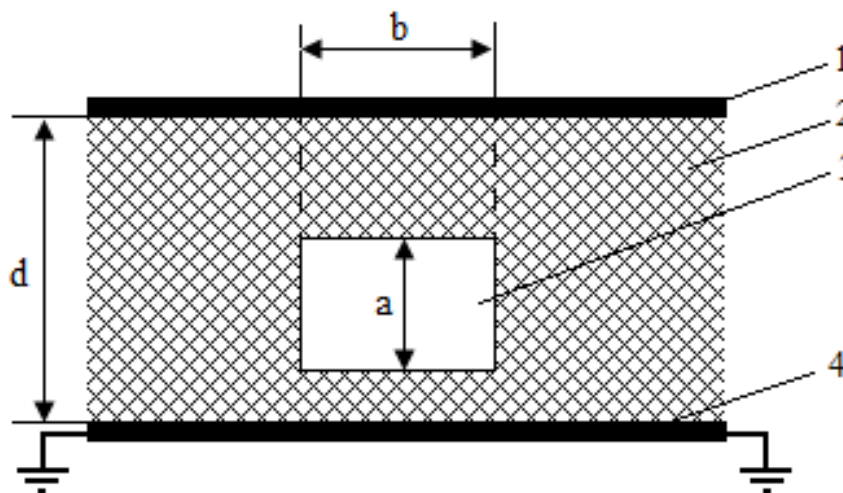


Рис. 11. Грубая модель воздушной полости в изоляции кабеля:  
1 – электрод (обкладка конденсатора); 2 – диэлектрик;  
3 – воздушная полость; 4 – жила кабеля.

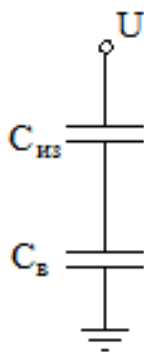


Рис. 12. Электрическая схема замещения изоляции с воздушной полостью.

При попадании дефекта между обкладками (заземленная жила и электрод (Рис. 11)) значение емкости конденсатора изменяется. Ниже представлены формулы для расчета емкости изоляционного слоя с дефектом (воздушная полость). Грубой моделью дефекта является параллелепипед с размерами  $axbxc$  ( высота, длина, ширина соответственно).

Емкость участка кабеля без дефекта длиной  $b$ :

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{b \times c}{d}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_r$  - относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика изоляции.

Емкость воздушной полости:

$$C_в = \varepsilon_0 \frac{b \times c}{a}$$

Емкость участка изоляции с дефектом:

$$C_{\Sigma} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{b \times c}{d + a \cdot (\varepsilon_r - 1)} \quad (5)$$

Сравнив формулы (4) и (5), можно отметить, что параметры дефекта оказывают заметное влияние на суммарное значение измеряемой емкости.

Учитывая, что контроль проводится в области сильных полей, всё испытательное напряжение будет приложено к участку изоляции  $(d-a)$ . Эквивалентная емкость участка изоляции с дефектом увеличится:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{b \times c}{d - a}$$

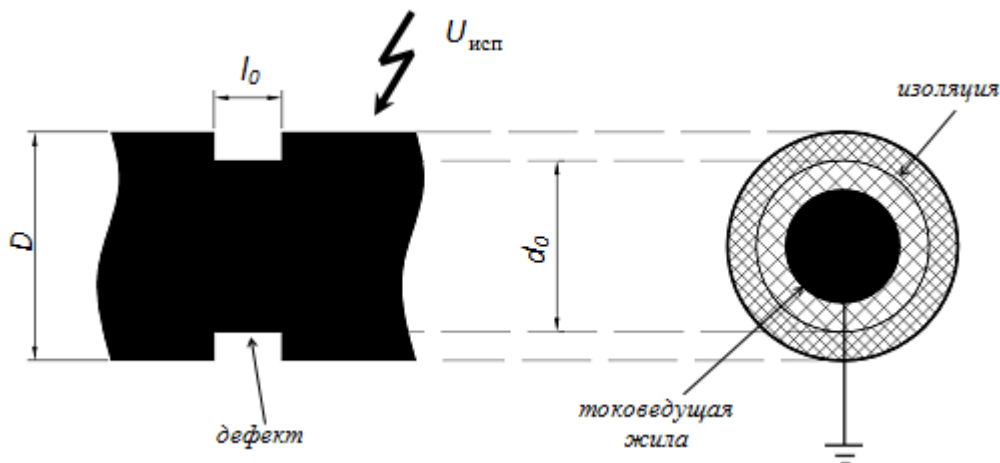


Рис. 13. Пример дефекта типа локальное утонение.

Далее рассмотрена возможность измерения емкости дефекта типа локальное утонение длиной  $l_0$ , изменение наружного диаметра кабеля с величины  $D$  до величины  $d_0$ .

Емкость изоляции без дефекта для участка кабеля длиной  $l$ :

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r l}{\ln(D/d_{жс})}$$

где:  $d_{жс}$  – диаметр токоведущей жилы.

Емкость дефектного участка кабеля длиной  $l_0$ :

$$C_0 = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r l_0}{\ln(d_0/d_{жс})}$$

где:  $d_0$  – наружный диаметр кабельного изделия на участке утонения.

Соотношение емкостей бездефектного и дефектного участка кабеля одинаковой длины:

$$k_c = \frac{C_0}{C} = \frac{\ln(D/d_{жс})}{\ln(d_0/d_{жс})}$$

При  $k_U = \frac{U_{проб}}{U_{исп}} = \frac{D - d_{жс}}{d_0 - d_{жс}} \leq 1,5$  и  $k_c \geq 1,2$  система уравнений будет иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{\ln(D/d_{жс})}{\ln(d_0/d_{жс})} \geq 1,2 \\ \frac{D - d_{жс}}{d_0 - d_{жс}} \leq 1,5 \end{cases}$$

Для провода НВ1-0,2 с диаметром жилы  $d_{жс}=0,6$  мм и с наружным диаметром  $D=1,3$  мм обнаруживаемое утонение будет составлять в диапазоне  $1,067\text{мм} \leq d_0 \leq 1,143\text{мм}$ . Дефекты типа

«локальное утолщение» ( $d_0 > D$ ) также встречаются при производстве. Очевидно, что такие дефекты имеют только ограничения по относительному размеру только снизу, так как увеличения радиальной толщины изоляции не приводит к снижению электрической прочности.

Соотношение емкостей бездефектного и дефектного участка кабеля одинаковой длины:

$$k_c = \frac{C}{C_0} = \frac{\ln(d_0/d_{жс})}{\ln(D/d_{жс})}$$

Для провода НВ1-0,2 с диаметром жилы  $d_{жс}=0,6$  мм и с наружным диаметром  $D=1,3$  мм обнаруживаемое утолщение будет составлять  $d_0 \geq 1,517$  мм.

Недостатком данного метода является невозможность определения дефектов в виде трещин, порезов на поверхности изоляции, так как изменение погонной емкости дефектного участка будет незначительным.

Рассмотрев вышеупомянутые методы, можно заметить, что каждый метод в отдельности не способен выявлять все виды существующих дефектов изоляции, т.е. для увеличения качества контроля изоляционного покрытия необходимо использовать данные методы в комплексе. Совместное использование позволяет выявлять все виды дефектов, но все же есть определенные ограничения регистрируемых дефектов, обусловленные методикой проведения испытаний, а также производственными условиями.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. КАБЕЛИ, ПРОВОДА И ШНУРЫ. Методы испытания напряжением: ГОСТ 2990-78. – Изд. июнь. 1986 с Изм. 1, 2, 3 (ИУС 11-81, 10-84, 10-86). – Взамен ГОСТ 2990-72, ГОСТ 17397-72; введ. 20.12.78.
2. Сканава Г.И. ФИЗИКА ДИЭЛЕКТРИКОВ (ОБЛАСТЬ СИЛЬНЫХ ПОЛЕЙ). – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1958. – 909 с.

#### Сведения об авторах:

**Старикова Н.С.:** г. Томск, магистрант первого года обучения кафедры Информационно-измерительная техника Национального исследовательского Томского политехнического университета. Сфера научных интересов: кабельная промышленность.

**Редько В.В.:** г. Томск, к.т.н., доцент кафедры Информационно-измерительная техника Национального исследовательского Томского политехнического университета. Сфера научных интересов: кабельная промышленность.

УДК

**РАЗРАБОТКА СТАНЦИИ МОНИТОРИНГА СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕЙ  
(DEVELOPMENT OF STATION OF MONITORING OF SOLAR POWER INSTALLATION)**

К.В. Суматохина, А. В. Охорзина,  
Научный руководитель Юрченко А. В, д.т.н, профессор  
K.V. Sumatohina, A.V. Ohorzina  
Supervisor: prof. A.V Yurchenko

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: animeshka533@sibmail.ru

В статье приводятся сравнительные характеристики станции мониторинга солнечной батареи и ее модификации. В работе описывается схема работы станции мониторинга и ее управление. Представлены данные измерения, которые автоматически регистрируются и отображаются на сайте.  
(Comparative characteristics of station of monitoring are provided in article solar batteries and its updating. In work the scheme of work of station of monitoring and its management is described. Measurements which are automatically registered and displayed on a site are submitted data.)

**Ключевые слова:**

Солнечная батарея, станция мониторинга.  
(Solar battery, monitoring station.)

В условиях уменьшения мировых запасов природного топлива (невозобновляемых ресурсов), большое внимание уделяется использованию солнечной энергии путем прямого преобразования в электрическую. Для этой цели применяются кремниевые солнечные элементы (СЭ). Они являются главным источником электроэнергии в космических аппаратах. Однако широкое использование СЭ на Земле сдерживается их значительной стоимостью. Снижение стоимости кремниевых солнечных элементов в основном ведется за счет уменьшения стоимости монокристаллического кремния и создания дешевых пленочных элементов на основе аморфного кремния. В обоих случаях важны деградационные и энергетические характеристики СЭ и соответственно солнечных батарей (СБ) изготавливаемых на их основе.

При преобразовании солнечного излучения (особенно при высоких уровнях солнечной радиации) в СБ выделяется некоторое количество тепла, и рабочая поверхность может нагреваться до 80-100 °С. Это приводит к повышенному износу параметров СЭ и снижению энергетических характеристик СБ при их использовании. Концентрация дефектов, определяющая степень деградации параметров элемента, будет зависеть не только от плотности интегрального потока солнечной радиации, но и от рабочей температуры СБ [1]. Поэтому необходимо изучение влияния температуры и освещенности на фотоэлектрические и радиационные характеристики кремниевых СЭ работающих в натуральных условиях.

До этого момента такая процедура производилась на мобильной станции мониторинга (рис.1).

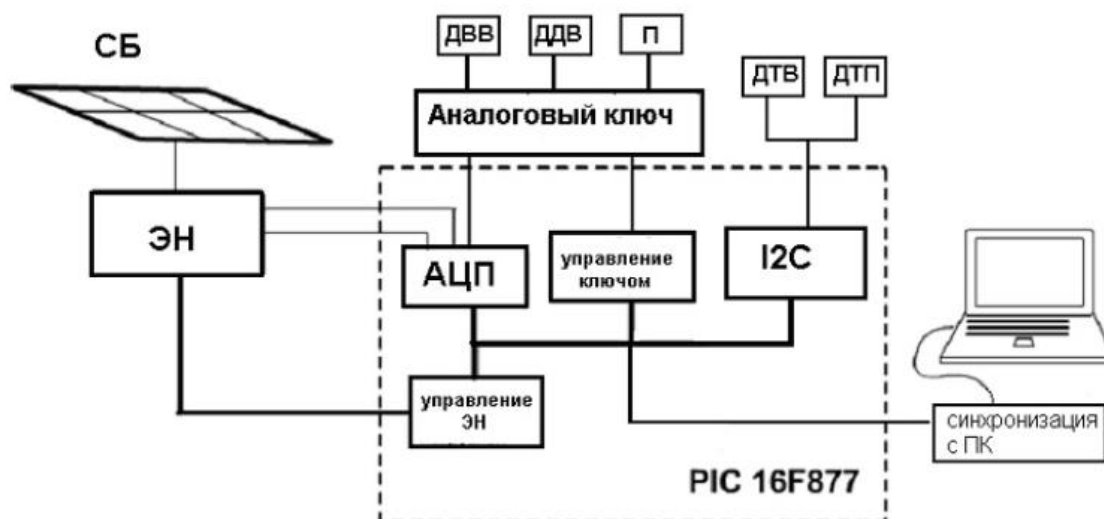


Рис. 1. Блок – схема станции мониторинга.

Станция работает следующим образом. Измерения начинаются в начале каждого часа. Затем, однократно с интервалом в одну минуту, регистрируется вольт – амперная характеристика (ВАХ) СБ, ее температура, температура воздуха, вычисляется рабочая точка ВАХ. По истечению пятнадцати минут измерения прекращаются до начала следующего часа. В итоге одного цикла для каждого параметра набирается одномерный массив, состоящий из пятнадцати элементов. Далее массив усредняется, и полученный результат сохраняется в файл данных. Причем, результаты измерения, где ток короткого замыкания СБ меньше 0.1 А не сохраняются. Такие значения тока короткого замыкания соответствуют сумеркам или ночной фазе суток и не представляет интереса для исследования [2].

Подобная схема реализации не позволяет измерять ВАХ при низкой освещенности. Количество точек ВАХ при  $S_r \leq 300 \text{ Вт/м}^2$  составляет 2-3 точки. Поэтому провели модификацию схемы измерения ВАХ на основе магазина сопротивлений и микроконтроллера OLIMEX-LPC-P2378. Число снимаемых точек достигает 30, что позволяет увеличить точность измерений.

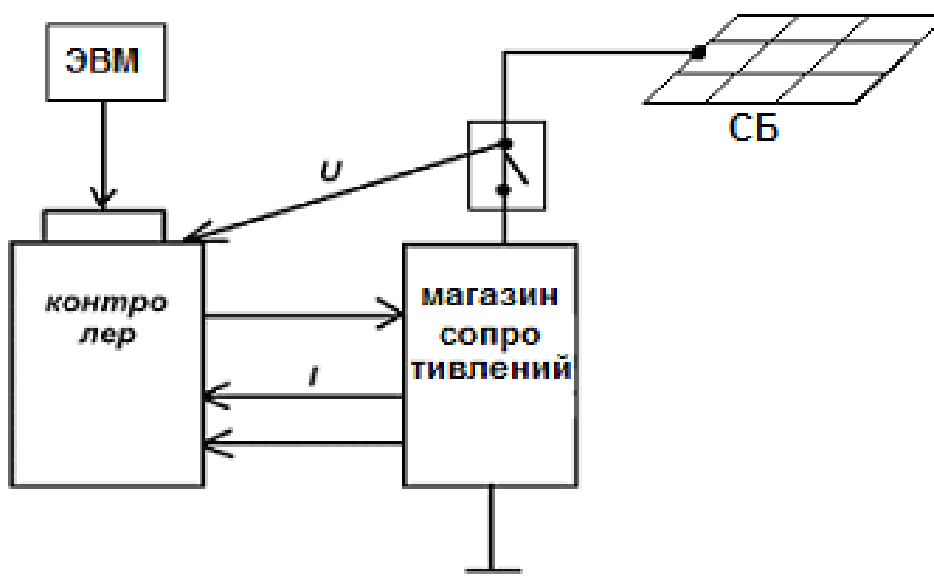


Рис. 2. Структурная схема станции мониторинга.

При запуске программы подается сигнал на МК, который подает управляющий сигнал на реле, которые подключают нагрузку. Нагрузка представляет собой магазин сопротивлений от 1

Ом до 8 кОм, что позволяет измерить ВАХ с большой точностью и определить рабочую точку (рис.3).

Управление станцией происходит при помощи программы, созданной на платформе LabVIEW (рис. 4).

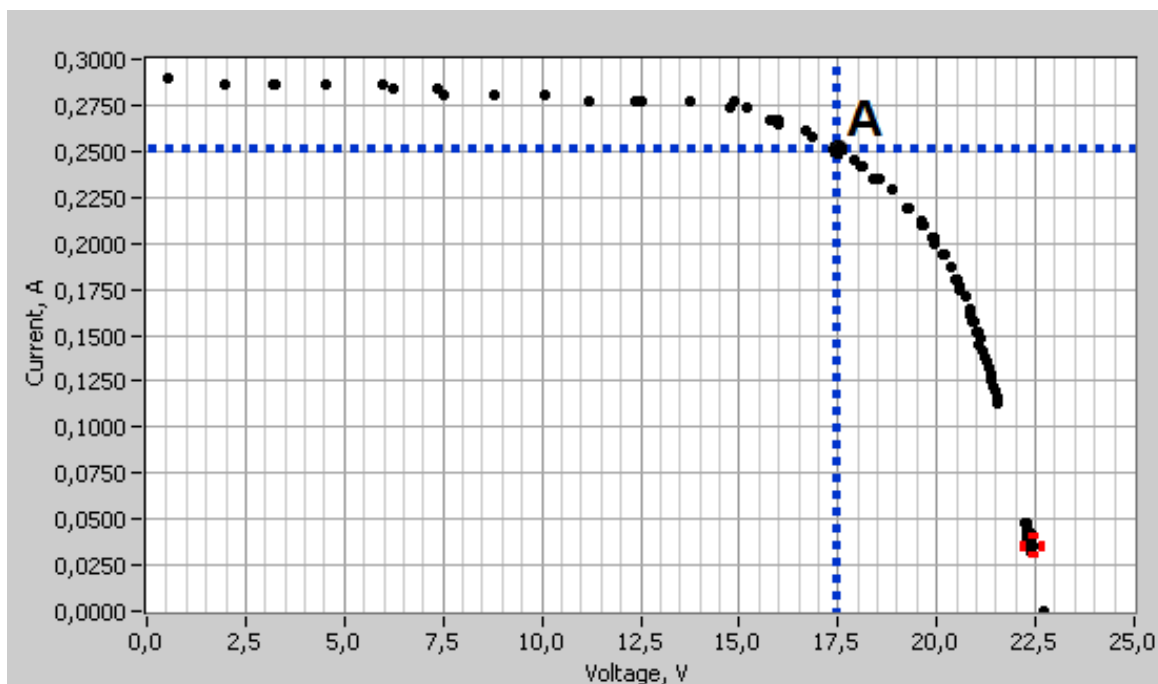


Рис. 3. Измерение ВАХ. А-рабочая точка.

В левом нижнем углу окна управления программой представлено 14 переключателей, которые позволяют проводить измерения в ручную, что дает возможность наиболее точно оценивать работу СБ.

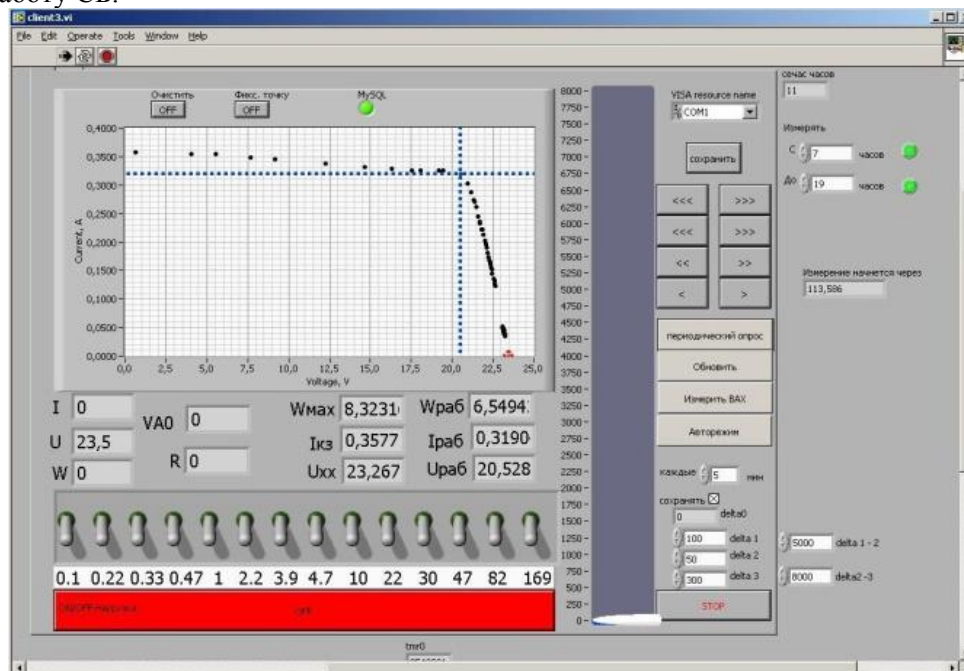


Рис. 4. Окно программы LabVIEW.

Разработанная станция мониторинга совместно с TOR-станцией позволяет измерять ВАХ СБ, определять ее параметры и измерять основные параметры климата. Это позволяет определить эффективность работы СБ при различных погодных условиях.

Данная станция установлена на крыше Института Оптики Атмосферы в Академгородке и подключена к СБ мощностью 25 Вт, установленной под углом  $45^\circ$  к горизонту в направлении на юг. Данные измерения автоматически регистрируются и отображаются на сайте [lor.iao.ru](http://lor.iao.ru) с января 2011 года (Рис.5).

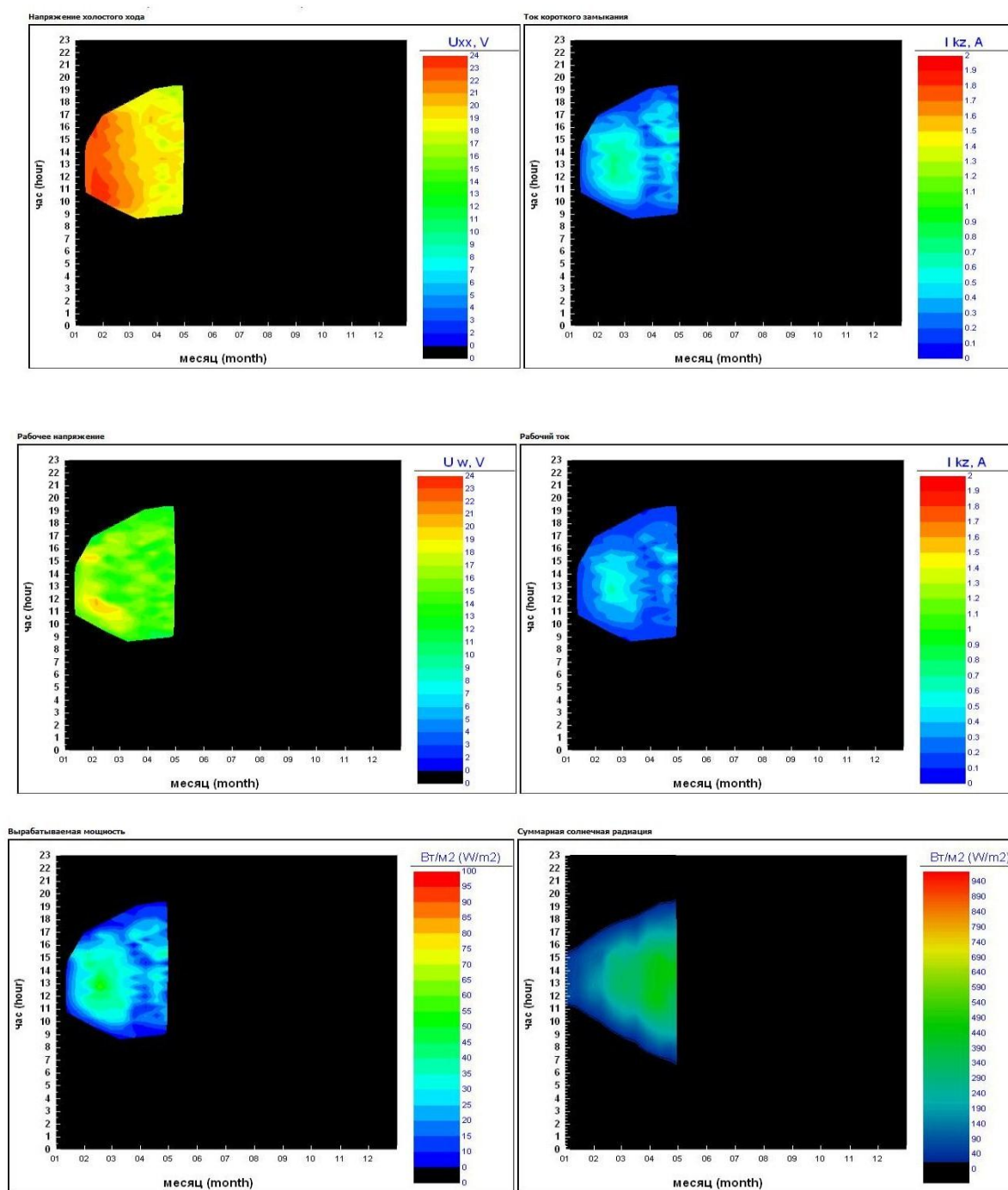


Рис. 5. Измерения станции.

**Выводы:**

1. Была модифицирована конструкция станции мониторинга и написана программа для измерения ВАХ СБ.
2. Измеренные характеристики СБ мощностью 25 Вт можно наблюдать в on-line-режиме по адресу <http://lor.iao.ru/activity/?id=sb>.



### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бариков М.Я. Фотоэлектрические и радиационные характеристики кремниевых солнечных элементов при повышенных освещенностях и температурах. // Физика и техника полупроводников. 1997. т. 31 №5 С. 520 – 522.
2. Юрченко А.В., Козлов А.В. Мобильная станция мониторинга работы солнечных батарей в натуральных условиях// Датчик и системы. - 2006. - №9. - С. 64-67.
3. <http://lop.iao.ru/activity/?id=sb>

**Сведения об авторах:**

**Ширшова А.М.:** г.Томск, магистр ТПУ, гр. 1М401.

**Охорзина А.В.:** г.Томск, студент ТПУ, гр. 1БМ12.

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ  
ДАТЧИКОВ  
(PERSPECTIVE DIRECTIONS OF AUTOMOBILE SENSORS CONSTRUCTION)**

О.А.Скрипка

Научный руководитель: доц.Винокуров Б.Б.

О.А. Skripka

Supervisor: B.B. Vinokurov

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: 041151@sibmail.com

В данной статье речь идет о последних разработках в области построения датчиков автомобиля и их применения. В качестве перспективных направлений рассмотрены: разработка технологии производства твердых электролитов для датчиков кислорода нового поколения, использование пьезокерамики и ее свойств, а также перспективы применения датчиков линейных перемещений на основе явления магнитострикции.

(In this article we are talking about the latest developments in the construction of the vehicle sensors and their applications. As discussed promising directions: development of production technology of solid electrolytes for oxygen sensors of new generation, the use of piezoelectric ceramics and its properties, also prospects for the application of linear displacement sensor based on the phenomenon of magnetostriction.)

**Ключевые слова:**

Автомобильная промышленность, MEMS – технологии, эффект магнитострикции.

(Automobile industry, MEMS - technology, effect of magnetostriction.)

Экономичность, экологичность, многофункциональность – основные принципы для создания современной техники и разработки новых технологий. В настоящее время в нашей стране остро стоит вопрос о создании автомобилей, которые соответствовали бы последним требованиям и стандартам. Как следствие, появляется потребность в совершенствовании отдельных элементов автомобиля и его систем в целом, развития новых направлений для создания более маневренных и комфортабельных автомобилей. К последним тенденциям развития автомобильной промышленности можно отнести также повышение использования электроники. С каждым годом специалисты находят ей все большее применение. Сегодня электронику используют для повышения безопасности и увеличения комфортности вождения [1]. Значительную часть автоэлектроники составляют датчики, необходимые для контроля корректного и согласованного функционирования автомобильных систем. Системы управления двигателем и трансмиссией, включая датчики, микроконтроллеры, ИС контроля питания, составляют приблизительно треть всей электроники автомобиля. В настоящее время увеличивается число эффектов, которые ложатся в основу разработок таких датчиков. Усовершенствование датчиков, контролирующих основные процессы двигателя, приносит увеличение экономичности, экологичности, снижение стоимости и увеличение срока службы основных элементов двигателя. Поэтому в настоящее время так актуален вопрос о совершенствовании подобных систем. В данной работе рассматриваются некоторые из последних перспективных направлений в построении датчиков автомобиля и приведены некоторые физические эффекты для их создания. В последнее время особое внимание уделяется улучшению экологической ситуации в странах. В связи с этим идет разработка технологии производства твердых электролитов для датчиков кислорода нового поколения, необходимых для контроля содержания кислорода в расплавах сталей, отходящих газах автомобильных двигателей и жидких теплоносителях атомных реакторов. Конечный продукт проекта - технология получения твердых электролитов на основе нанокристаллических порошков диоксида циркония для датчиков контроля кислорода в расплавах металлов и газов. Применение нанокристаллических порошков позволяет создать уникальную структуру. Благодаря подобной структуре возможно повышение чувствительности и точности измерений датчиков, что повышает конкурентоспособность отечественных датчиков кислорода. Твердые

электролиты для датчиков контроля кислорода в отходящих газах автомобильных двигателей будут обладать следующими свойствами: высокой устойчивостью к воздействию высоких температур до 1 000 °С в агрессивной водно-солевой атмосфере в условиях постоянной вибрации; устойчивостью к градиенту температур на керамическом наконечнике до 50 °С/с. В настоящее время разрабатываются научные и технологические основы получения исходных нанокристаллических порошков на основе диоксида циркония для создания ионопроводящих материалов. Эти материалы обладают высокой механической прочностью, термической и химической стойкостью, а также стабильностью электрических характеристик [2]. Одним из перспективных направлений в развитии техники и технологий является использование пьезокерамики. До сих пор свойства пьезокерамики не в полной мере востребованы наукой, техникой и технологиями, что еще раз подтверждает актуальность развития данного направления и использование его для создания датчиков автомобиля. Современные требования по энергосбережению, миниатюризации, адаптивности к компьютерным системам управления и контроля заставляют производителей техники и оборудования обращаться к производителям пьезокерамики. Цель - совместный поиск технологических решений с помощью пьезокерамики. В результате взаимной работы появляются новые типы пьезокерамики, создаются новые и совершенствуются известные пьезокерамические элементы и компоненты. В качестве примера подобной работы можно привести американских производителей автомобильной техники, которые активно используют устройства и узлы на базе пьезоэлектрической керамики. Примерами таких устройств могут служить:

- актюаторы-клапаны впрыска топлива;
- датчики поворота; датчики детонации;
- датчики уровня заправочных жидкостей;
- датчики давления; пьезоприводы;
- дистанционные датчики;
- скоростные сенсоры в передней панели для подушек безопасности;
- аварийные датчики;
- актюаторы системы антиблокировки тормозов и пр.

Инновационная разработка актюаторов (пьезоприводов) и датчиков обеспечивает решение многих проблем автомобилестроения и улучшает эксплуатационные качества автомобиля, которые отвечают жестким эксплуатационным требованиям. Также разработана высокотемпературная и высокостабильная пьезоэлектрическая керамика, которая предназначена для применения в топливных системах двигателей современных автомобилей. Данная керамика обладает значительной стойкостью к высоким температурам и противоударна. Единообразная частотная реакция делает датчики из данной керамики пригодной для любого типа автомобильного двигателя. Таким образом, пьезокерамика, благодаря своим уникальным свойствам, находит все большее применение в различных областях техники и технологии. Иностранные производители пьезокерамики, элементов и компонентов на ее базе проводят исследования и конструкторские работы с целью улучшения параметров керамики, разрабатывают ее новые типы. С целью удешевления продукции разрабатываются новые технологии, более энергосберегающие и позволяющие автоматизировать процессы производства[3]. На данный момент быстро развиваются технологии микроэлектромеханических систем. Преимуществами подобных систем являются:

- миниатюрность;
- функциональность;
- надёжность;
- малое энергопотребление;
- простота интегрирования.

Благодаря своим достоинствам подобные системы востребованы сегодня практически всеми рынками электроники. Концепция MEMS построена на интеграции микромеханических структур датчиков (измерительной части) и актюаторов (исполнительной, управляющей части) с электроникой, выполняющей функции сбора, анализа, контроля, формирования управляющих сигналов на общей подложке посредством технологий микропроизводства. Микросистемы выполняют сенсорные, вычислительные, логические, исполнительные, коммуникационные

функции, а также функции обеспечения самопитания и безопасности. Это означает, что многие рынки – и массовые, и рынки уникальных продуктов смогут использовать преимущества MEMS технологии оптимальным образом, в том числе и при работе компонентов в жёстких условиях эксплуатации [4]. К MEMS технологиям можно отнести платиновые тонкопленочные RTD, изображенные на рисунке 1, микромеханические MEMS-расходомеры массы воздуха, включающие тонкопленочные нагреваемые и управляющие электронные элементы, размещенные на одной подложке, а также датчики концентрации кислорода. Благодаря использованию материалов, обладающих наилучшими свойствами, MEMS являются уникальными по своей структуре и широко применимы. Применение подобных систем приведет к уменьшению габаритных размеров конструкций, уменьшению их стоимости, увеличению срока службы отдельных элементов и системы в целом.

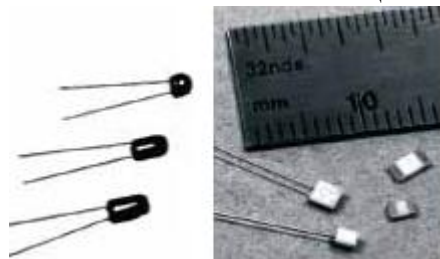


Рис. 1. Тонкопленочные резистивные элементы PRE/C Thermometrics (слева) (-70...+250°C) и платиновые RTD Honeywell (справа) (-70...500°C) [5].

Использование датчиков на основе явления магнитострикции также является одним из приоритетных направлений в автомобилестроении. Магнитострикция была обнаружена в ферромагнитных материалах, таких как: железо, никель, кобальт и их сплавах. При помещении ферромагнетика в магнитное поле происходит деформация его структуры, что вызывает изменение физических размеров ферромагнетика. Например, если стержень из ферромагнитного сплава поместить в магнитное поле параллельное его оси, то стержень испытает механическую деформацию и получит линейное удлинение, изображенное на рисунке 2.



Рис. 2. Удлинение ферромагнитного стержня, помещенного в магнитное поле.

В качестве примера датчика, в основе которого лежит магнитострикционный эффект, рассмотрен датчик линейных перемещений, конструкция которого показана на рисунке 3. Датчик состоит из 5 основных частей:

- измерительный элемент (волновод);
- электроника датчика;
- постоянный магнит;
- преобразователь торсионного импульса;
- демпфирующее устройство.

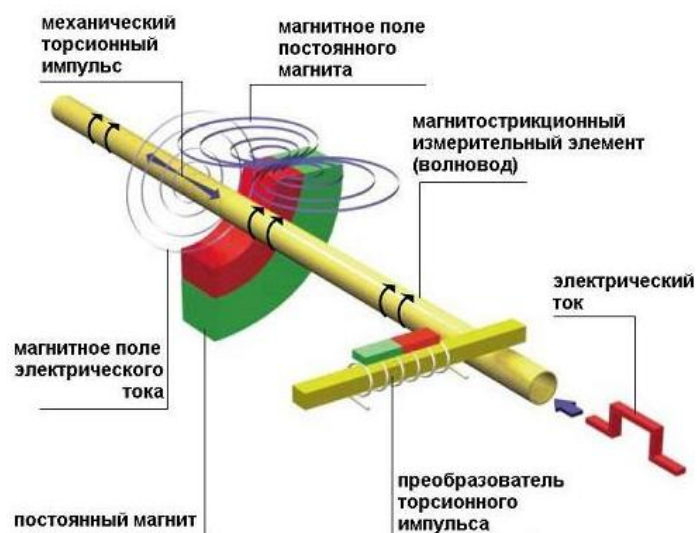


Рис. 2. Устройство магнитострикционного датчика линейных перемещений.

Измерительный процесс подобного датчика инициируется коротким импульсом тока, который посылается из электронной части сенсора по медному проводнику. При перемещении импульса возникает радиальное магнитное поле вокруг волновода. При пересечении с магнитным полем постоянного магнита- позиционера, возникает, согласно эффекту Видемана, пластическая деформация магнитострикционного волновода, которая является высокочастотным процессом, вследствие скорости токового импульса. Вследствии этого процесса возникает ультразвуковая торсионная волна, которая распространяется от места возникновения в оба конца волновода, однако в одном из концов она полностью гасится, что способствует исключению помех и искажений сигнала. Волновод в сенсорах линейных перемещений имеет наружный диаметр 0.7 мм, а внутренний 0.5 мм. Медный проводник проходит по всей длине волновода. Скорость распространения торсионного импульса в волноводе составляет 2830 м/с, и на него практически не оказывает влияния внешние факторы (загрязнения, температура, удары и т.д.). Детектирование и обработка торсионного импульса происходит на другом конце волновода в специальном преобразователе [6]. Магнитострикционные датчики обладают следующими достоинствами:

- бесконтактное определение положения объекта;
- нечувствительность к загрязнениям;
- отсутствие механического износа;
- нечувствительность к ударам и вибрации;
- высокое разрешение;
- невысокая стоимость.

Подобной конструкцией могут обладать не только датчики линейных перемещений, но и датчики уровня жидкости, принцип работы которых основан на эффекте магнитострикции. В конструкции подобных датчиков магнит-позиционер встроен в поплавок. Таким образом, для создания пневматической подвески с автоматическим управлением идеальным образом подходит именно магнитострикционный датчик линейных перемещений. Подобный датчик встраивается в амортизаторы и при колебании автомобиля с определенной частотой и амплитудой передает сигнал на блок управления, который принимает решение о регулировании клиренса автомобиля с помощью пневмоподвески. В данном примере возможно управление с помощью подачи сигнала на блок управления с салона автомобиля по желанию водителя. Подобная система проста по своей конструкции, долговечна и не требует дополнительных знаний при обслуживании. На сегодняшний день подобного применения магнитострикционных датчиков линейного перемещения не существует, что подтверждает актуальность подробного рассмотрения данной темы. В качестве исполнительного элемента пневматической подвески с автоматическим регулированием используется компрессор. Подобная конструкция пневматической подвески приведена на рисунке 3.

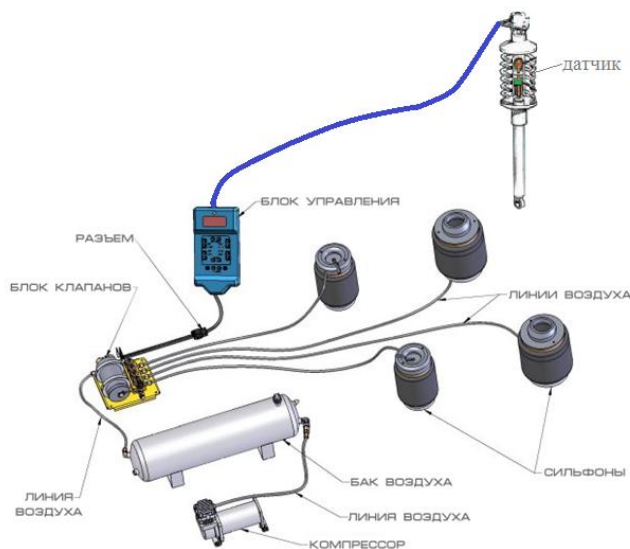


Рис. 3. Пневматическая подвеска с автоматическим регулированием.

Таким образом, использование последних разработок в области техники и технологий может значительно повлиять на развитие автомобильной промышленности России. Применение данных разработок напрямую повлияет на улучшение экологической ситуации, снижению стоимости автомобилей, улучшению их характеристик и комфортабельности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инновации. [Электронный ресурс].- Режим доступа: <http://www.innovprom.ru/innovacii-v-avtomobilestroenii> , свободный. – Загл. с экрана.1
2. Твердые электролиты для датчиков кислорода. Разработка технологии производства. [Электронный ресурс].- Режим доступа: <http://rusnanonet.ru/products/50098/> 2 , свободный. – Загл. с экрана.
3. О пьезокерамике и перспективах ее применения. [Электронный ресурс].- Режим доступа: <http://kazu.ru/articles/368.html> 3 , свободный. – Загл. с экрана.
4. MEMS - технологии – простое и доступное решение сложных системных задач. [Электронный ресурс].- Режим доступа: <http://www.sovtest.ru/ru/publication/mems-tekhnologii---prostoe-i-dostupnoe4> , свободный. – Загл. с экрана.
5. Новые тенденции и перспективные технологии автомобильных датчиков систем Powertrain и контроля эмиссии. Часть 2. О датчиках температуры и обо всех остальных. [Электронный ресурс].- Режим доступа: [http://kit-e.ru/articles/sensor/2006\\_8\\_22.php](http://kit-e.ru/articles/sensor/2006_8_22.php) , свободный. – Загл. с экрана.
6. Принцип действия магнитострикционных датчиков линейных перемещений Balluff Micropulse. [Электронный ресурс].- Режим доступа: [http://www.toool.ru/articles/rincip\\_deistviya\\_magnitostrikcionnih\\_datchikov\\_lineinih\\_peremeschenii\\_balluff\\_micropulse.html](http://www.toool.ru/articles/rincip_deistviya_magnitostrikcionnih_datchikov_lineinih_peremeschenii_balluff_micropulse.html) 6 , свободный. – Загл. с экрана.

#### Сведения об авторах:

Скрипка О.А.: г.Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, магистрант первого года обучения.

УДК

**НЕЙРОННЫЕ СЕТИ В АКТИВНОМ ТЕПЛОВОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ  
(АТНК)  
(NEURAL NETWORKS IN ACTIVE THERMAL NONDESTRUCTIVE TESTING)**

А.М. Ширшова  
A.M. Shirshova

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Email: sadale@mail.ru

Аннотация  
(Аннотация на английском языке)

**Ключевые слова:**

Активный тепловой неразрушающий контроль (АТНК), нейронные сети (НС), дефекты.  
(Active thermal nondestructive testing, neural networks, defects.)

В настоящее время одним из важнейших вопросов является контроль качества продукции. На данный момент уже существует множество методов контроля, однако наиболее востребованными являются неразрушающие методы контроля, т.к. они не наносят какого-либо ущерба контролируемой продукции. Одними из таких методов являются методы неразрушающего контроля теплового вида.

В тепловых методах неразрушающего контроля в качестве пробной энергии используется тепловая энергия, распространяющаяся в объекте контроля. Температурное поле поверхности объекта является источником информации об особенностях процесса теплопередачи, которые, в свою очередь, зависят от наличия внутренних или наружных дефектов. Под дефектом при этом понимается наличие скрытых раковин, полостей, трещин, непроваров, инородных включений и т.д., всевозможных отклонений физических свойств объекта от нормы, наличия мест локального перегрева (охлаждения) и т.п.

Активный ТНК предполагает нагрев объекта внешними источниками энергии. В случае использования АТНК в дефектоскопии, например для обнаружения дефектов в виде нарушения сплошности (раковин, трещин, мест непрочлея), информацию о дефектах несут в себе локальные неоднородности температурного поля на поверхности объекта контроля [1].

Таблица 1. Области применения АТНК

| Сфера деятельности        | Применение   |
|---------------------------|--|
| Авиакосмическая индустрия | ИК - влагометрия; дефекты структуры композитов, готовых панелей, клеевых соединений, защитных покрытий                             |
| Микроэлектроника          | Лазерный контроль пайки; ИК — томография полупроводников, БИС; дефекты теплоотводов  |
| Машиностроение            | Дефектоскопия антикоррозийных покрытий, обнаружение мест подповерхностного расслоения композитных структур                         |
| Лазерная техника          | Контроль термонапряжений в лазерных кристаллах, ТФК кватронов, световой прочности элементов силовой оптики                         |
| Материаловедение          | Тепловая диагностика напряженного состояния объектов на основе термоэластического эффекта, контроль ТФК конструкционных материалов |

Окончание таблицы 1

|                              |  |
|------------------------------|--|
| Строительство                | Контроль теплопроводности строительных материалов, защитных ограждений, обнаружение пустот, пробоин и т.д. |
| Нефтехимия                   | Термографический контроль уровня жидкости в резервуарах  |
| Атомная энергетика           | Тепловая дефектоскопия ТВЭЛ, анализ пористости материалов, контроль напряженного состояния металла         |
| Автомобильная промышленность | Тепловая дефектоскопия шин, покрытий, упрочняющих покрытий, качества закалки и термоупрочнения             |
| Энергетика                   | Тепловизионный контроль статоров, защитных покрытий, термоизоляции   |
| Агрокомплекс                 | Контроль ТФК продуктов, дефектоскопия деталей с/х техники  |

При использовании этих методов исследуются тепловые процессы, причем в большинстве случаев регистрируется поверхностное тепловое или температурное поле объекта контроля. Анализируя тепловое поле объекта контроля можно обнаружить геометрические или теплофизические дефекты. Информацию о картине теплового поля содержат в себе ИК изображения. Существуют различные методы обработки ИК изображений.

С помощью преобразования Фурье можно исследовать глубины проникновения температурных волн различной частоты в твердое тело. Анализ высокочастотной части спектра обеспечивает информацию о поверхностном и приповерхностном слоях, тогда как низкочастотная часть спектра ответственна за температурные отклики от глубоких дефектов. Если взглянуть на фазограмму, полученной методом Фурье-анализа, то на ней видно до 15 дефектов, однако качество изображения невелико, в том числе вследствие того, что дефекты на различных глубинах создают сигналы различного знака по сравнению с бездефектными зонами. Определенная трудность в интерпретации фазограммы в Фурье-пространстве состоит в том, что результаты преобразования Фурье зависят как от величины интервала оцифровки температурных данных, так и от числа этих интервалов.

Эффективным оказался метод анализа главных компонент, применение которого позволяет обнаруживать до восемнадцати дефектов. Таким образом, использование предложенной нейронной сети обеспечило не худшие результаты по сравнению с методом анализа главных компонент который, по мнению авторов, является одним из первоочередных методов, рекомендуемых при анализе результатов ТК изделий различного вида. [2, 3]

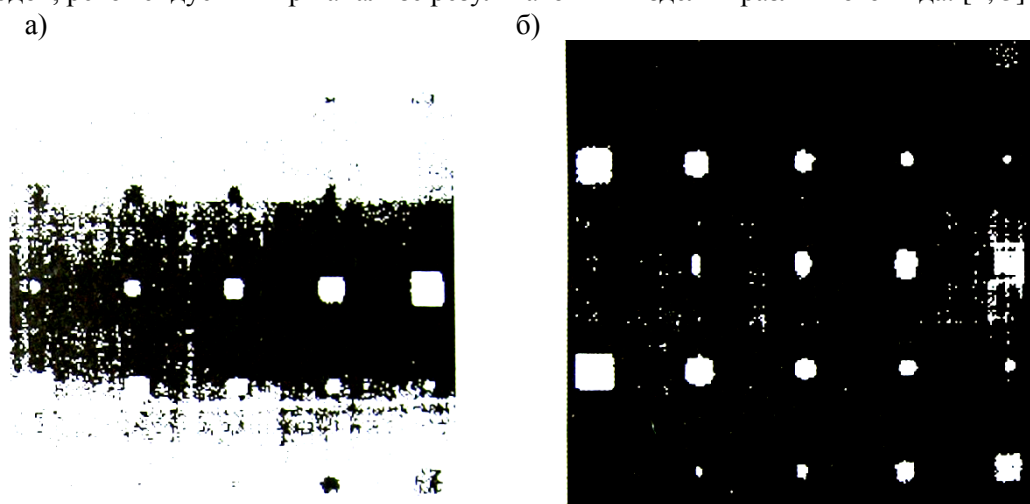


Рис. 1. а) Фурье-анализ; б) метод главных компонент.

В последние десятилетия в мире бурно развивается новая прикладная область математики, специализирующаяся на искусственных нейронных сетях. Нейронную сеть



рассматривают как набор простых процессоров, соединенных многочисленными взаимными связями. Процессоры обладают внутренней памятью на простые операции, приобретенной в результате первоначального обучения. Обычно в структуре нейронных сетей выделяют отдельные слои, а параллельный характер сетей делает их пригодными для решения многопараметрических задач, в том числе в качестве классификаторов образов.

Структура нейронной сети, состоящей из одного нейрона, приведена на рисунке 2.

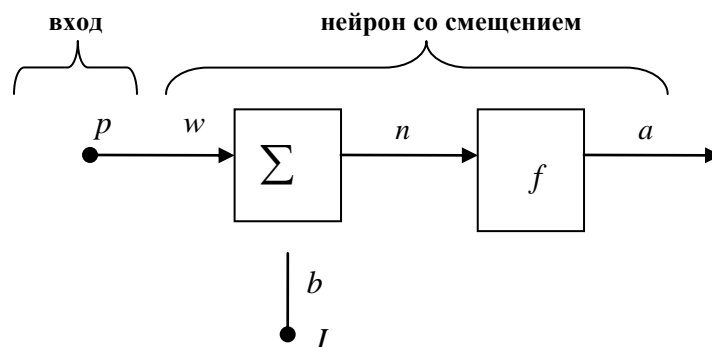


Рис. 2. Искусственный нейрон со смещением.

Вход нейрона умножается на весовой коэффициент  $w$  и подается на сумматор, где суммируется со смещением  $b$ , результат  $n$  подается на вход функции активации нейрона  $f$ . Уравнение нейрона со смещением имеет вид:

$$a = f(wp + b) \quad (1)$$

Регулируя вес и смещения можно обучить сеть выполнять определенную работу. Кроме того, для достижения требуемого результата сеть сама может корректировать свои параметры. Таким образом, преимуществом использования нейронных сетей в дефектоскопии является их способность учиться определению малых различий между идентифицируемыми классами объектов (дефектов) благодаря тренировке на соответствующим образом выбранных эталонных данных, которые получают экспериментально или теоретически.

Технически обучение сети заключается в нахождении весов и смещений нейронов, совокупность которых минимизирует ошибку обучения. Последняя определяется путем прогона через сеть всех имеющихся наблюдений и сравнения выходных данных с желаемыми целевыми значениями. Эти разности позволяют сформировать функцию ошибок. Таким образом, обучение сети является процедурой изучения поверхности функции ошибок. Алгоритм обучения постепенно отыскивает локальный (глобальный) минимум.

В тепловом контроле с его зашумленными входными данными нейронные сети смогут быть эффективным инструментом как тепловой дефектоскопии (в качестве обнаружителя дефектов), так и дефектометрии (в качестве классификатора дефектов).

Для обработки результатов ТК углепластикового композита с шестью фторопластовыми вставками на глубинах 1,3; 2,6 и 4 мм использовали однослойный перцептрон (нейрон рис.1 с двадцатью пятью входами и жесткой функцией активации), который был реализован с помощью математического редактора MatLab, содержащего комплекс функций для работы с нейронными сетями (Neural Network Toolbox).

Число входов перцептрона соответствует числу изображений в выбранной тепловизионной последовательности, равному в конкретном случае 25. Выбор перцептрона связан с необходимостью классификации векторов входа по двум классам – дефектные и бездефектные пиксели в изображениях. Для обучения сети был сформирован набор входных данных и вектор целей. Каждый вектор из входного набора данных соответствовал одной цели – идентификации дефектного или бездефектного пикселя (1 или 0 в численно выражении). В качестве входных данных был использован набор векторов соответствующих дефектным и бездефектным областям для образца. В данном случае вектор данных состоял из значений температуры для выбранного пикселя изображения. Вектор целей состоял из

последовательности нулей и единиц, где нуль обозначал бездефектный пиксель, а единица – дефектный пиксель.

Для обучения сети использовалась функция адаптации нейронной сети, в которой для заданного числа циклов адаптации итеративно вычисляются коэффициенты передачи и смещения в нейронной сети, так чтобы минимизировать ошибку нейронной сети. В ряде случаев тренировки нейронной сети было достигнуто полное соответствие между векторами входа и целями, т.е. ошибка нейронной сети после обучения была равна нулю. В некоторых случаях полное соответствие между входом сети и целями не было достигнуто даже за большое количество циклов адаптации сети (до 100 000 циклов), в данном случае приводился график погрешности для каждого вектора входа. После завершения процесса обучения нейронная сеть применялась для обработки всех векторов данных последовательности и построения карты дефектов.

При выборе векторов входа для обучения использовался фиксированный набор векторов дефектных зон, а выбор бездефектных зон при каждом обучении и применении нейронной сети был различным для оценки влияния исходных данных на эффективность обучения нейронной сети. Выбор дефектных зон для обучения соответствовал самому глубокому и самому близкорасположенному к поверхности дефекту.

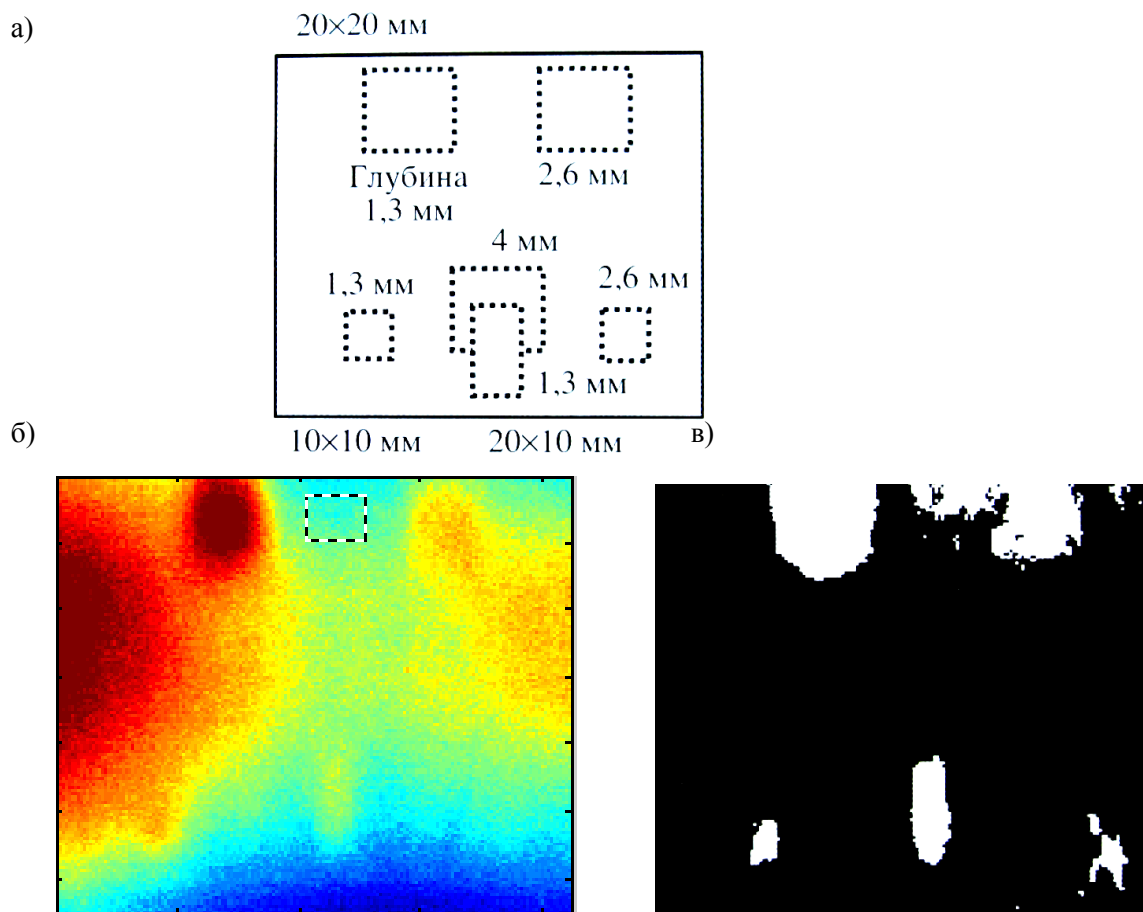


Рис. 3. Обнаружение дефектов в углепластиковом композите 4 мм (дефекты на глубинах 1,3; 2,6 и 4 мм) с помощью однослойного персептрона, имеющего 25 входов:  
а) схема расположения дефектов; б) исходная термограмма в момент оптимальной регистрации (пунктиром показана бездефектная область, использованная для обучения нейронной сети); в) бинарная карта дефектов после 40 000 циклов адаптации.

На рисунке 3 приведен результат использования персептрона для обработки экспериментальной последовательности при ТК углепластика.

Полученные предварительные результаты применения простой нейронной сети для анализа результатов ТК позволяют сделать вывод, что она является простым инструментом

получения бинарных карт дефектов, который позволил обнаружить пять дефектов в исследованном стандартном образце при эффективном подавлении эффекта неравномерного нагрева. При этом не был обнаружен дефект на глубине 4 мм, расположенный частично под дефектом 2,6 мм; однако заметим, что этот дефект не выявлялся так же ни одним из других использованных методов, в том числе с помощью Фурье-анализа, полиномиальной аппроксимации и выделения главных компонент.

Для осуществления тепловой дефектометрии и томографии разработана однослойная нейронная сеть, состоящая из  $S$  персептронов, причем число персептронов выбрали равным числу классов объектов, по которым необходимо распознавать входные данные. Исследования проводили на стандартном образце из углепластика представленном на рисунке 4, в котором дефекты располагались на пяти глубинах: 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 и 1,0 мм (исходная экспериментальная последовательность ИК термограмм представлена W. Swiderski, WITU, Польша, томографический анализ образца описан в [4]). Соответственно использовали нейронную сеть с шестью персептронами, причем в шестом персептроне выход был предназначен для идентификации бездефектных зон. Распознавания проводили по пяти глубинам расположения дефектов в исследуемом образце.

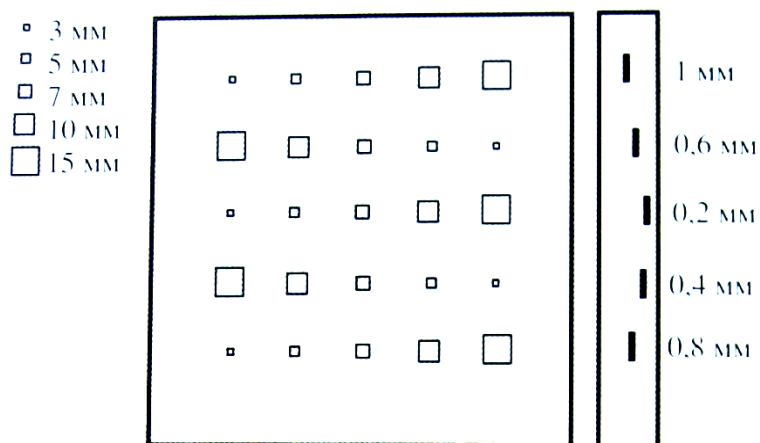


Рис. 4. Стандартный образец десятислойного углепластика толщиной 2 мм.

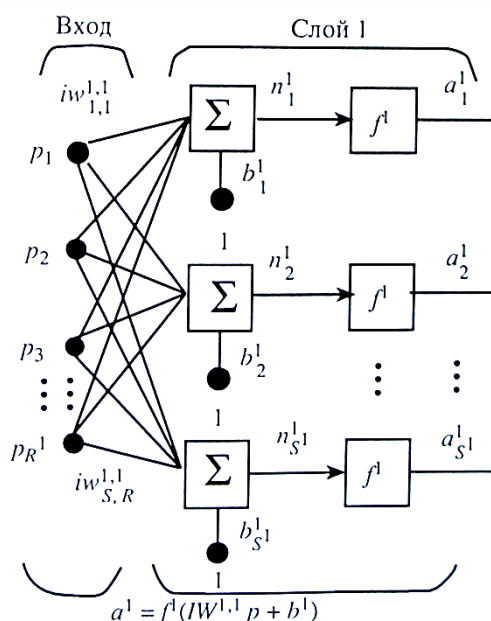


Рис.5. Структура нейронной сети с  $S$  персептронами.

Структурная схема использованной нейронной сети показана на рисунке 5, где  $b$  – вектор смещений нейронной сети;  $p$  – вектор входа (входные данные нейронной сети);  $IW$  – матрица весов входа;  $f$  – функция активации нейрона;  $a$  – вектор выхода нейронной сети;  $R$  – число входов нейронной сети;  $S$  – число нейронов.

На вход сети подавали вектор размерностью  $R \times 1$ ,  $R$  – число термограмм в последовательности. Например, если обрабатывали последовательность термограмм размером  $320 \times 240$ , состоящую из 62 кадров, то на вход нейронной сети подавали вектор размерностью  $62 \times 1$ , отражающий изменение пиксельной температуры во времени при общем количестве пикселей в отдельных термограммах  $320 \times 240 = 76\ 800$ .

Для активации нейрона использовали функцию с жестким ограничением  $f_1(x) = 1$ , если  $x \geq 0$  и  $f_1(x) = 0$ , если  $x < 0$ . Выходом нейронной сети является вектор размерностью  $S \times 1$ . Обучающая и целевая последовательности были сформированы таким образом, что если нейронная сеть, состоящая, например, из  $S = 6$  персептронов дает на выходе вектор  $[1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$ , то пиксель, который был передан на вход нейронной сети, будет отнесен к первому классу. Выход  $[0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0]$  относит пиксель ко второму классу объектов и, соответственно, выход  $[0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1]$  определяет бездефектную область. Число шагов обучения выбиралось эмпирически по «видности» дефектов оператором и в приведенных ниже результатах задавались равным 100 000. Время обучения подобной нейронной сети на стандартном ПК составило около 7 минут.

Результатом обработки экспериментальной последовательности ИК термограмм нейронной сетью явилась последовательность из шести бинарных изображений размерностью  $320 \times 240$  элементов. Каждое бинарное изображение было отнесено к определенному классу объектов: первое изображение – 1-й класс объектов, второе изображение – 2-й класс объектов и т.д.

Обученной нейронной сети удалось наиболее уверенно распознать объекты классов 1 и 2, то есть дефектов, которые залегали на глубинах 0,2 и 0,4 мм. Обнаружение более глубоких дефектов происходило с ошибками и сопровождалось появлением артефактов, что, по-видимому, связано с неравномерным нагревом изделия (на глубине 1,0 мм дефекты не идентифицировались).

Разработанная нейронная сеть с одним бинарным выходом, обуславливает ее применение для тепловой дефектоскопии. Для осуществления тепловой дефектометрии и тепловой томографии создана нейронная сеть с произвольным числом выходов. Эффективность последней проверена для случая шести выходов при обработке результатов ТК стандартного образца из углепластика. Комбинированная томограмма стандартного образца, полученная с помощью нейронной сети путем комбинирования томограмм пяти слоев, по качеству не уступала аналогичной томограмме, полученной методом динамической тепловой томографии. Применение нейронных сетей наиболее эффективно при неразрушающем контроле однотипных изделий, что требует только однократного обучения сети. Задача снижения шумов процедуры перед обучением и распознаванием, а так же оптимизации числа циклов обучения, требует дальнейших исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.5: В 2 кн. Кн. 1: Тепловой контроль./В.П. Вавилов. – М.: Машиностроение, 2004. – 679 с.
2. Вавилов В.П., Маринетти С. Импульсная фазовая термография и тепловая томография на базе преобразования Фурье // Дефектоскопия. – 1999. - №2. - С. 58-72.
3. Вавилов В. П., Ширяев В. В., Хорев В. С. Обработка результатов активного теплового контроля методом вейвлет-анализа // Дефектоскопия. – 2011. - №4. - С. 70-79.
4. Вавилов В.П., Нестерук Д.А., Ширяев В.В., Иванов А.И., Swiderski W. Тепловая (инфракрасная) томография: терминология, основные процедуры и применение для неразрушающего контроля композитных материалов // Дефектоскопия. – 2010. - №3. - С. 3-15.

### Сведения об авторах:

**Ширшова А.М.:** г.Томск, магистр ТПУ, гр. 1М401.

УДК

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ МНОГОСЛОЙНЫХ  
ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ  
(DETERMINATION OF THE RESISTANCE OF BUILDING ENVELOPES)**

А.А. Острасть

A. Ostrast

Национальный исследовательский Томский Политехнический Университет  
634021, Россия, г.Томск, ул. Савиных, 7  
E-mail:osa2710@mail2000.ru

**Аннотация на русском языке**

(Infrared imaging is a non destructive method, which determines the thermal behaviour of building materials in situ. Through infrared imaging, thermal bridges, moisture absorbed by buildings' materials as well as other parameters related to a building's thermal and energy behaviour can be determined.

A building's heat losses can be distinguished into conduction losses through its envelope and losses due to ventilation and infiltration. Losses through a building's envelope are related to the thermal resistance of its different parts and components used. In order that the thermal resistance (R) of the building's parts is determined, the parameter  $1/\alpha_e$ , thermal resistance of the exterior surface), which depends on meteorological conditions, should be determined. This work presents a method for the calibration necessary to calculate the thermal resistance (R) of different parts of the building's envelope.

Through the application of this method the thermal behaviour of unknown materials in buildings can be determined in situ.)

**Ключевые слова:**

**Ключевые слова на русском языке.** Тепловое сопротивление, тепловизор, энергоаудит  
(Thermal resistance, thermal imager, energy audit.)

Техническое обследование здания – это процесс, который может включать в себя контроль качества строительства, испытания образцов собранных во время проведения строительной экспертизы, анализ состояния конструкций здания, тепловизионное обследование (инфракрасный контроль качества) ограждающих конструкций, георадарное обследование фундамента и грунтов под ним. Техническое обследование здания проводится в целях выяснения эксплуатационных качеств конструкций, целесообразности проведения реконструкции или ремонта здания, выяснения причин аварий, прогнозирования поведения конструкций в будущем.

В последние 20 лет в России энергосбережению уделяют все большее внимание. Увеличение требуемого сопротивления теплопередаче можно назвать взвешенным, хорошо продуманным решением, отражающим отношение к вопросам энергосбережения как к особо важным.

Сплошные кирпичные кладки наружных стен неприемлемы при переходе на новые нормативы. Устройство многослойных наружных стен со средним теплоизоляционным слоем и облицовкой из кирпича, по сравнению со сплошной кладкой, не ведет к значительному изменению стоимости 1 м<sup>2</sup> общей площади, а затраты на отопление снижаются на 40–80 %

Появление новых изоляционных материалов и их использование в строительстве дает новые возможности проектирования новых и модернизации существующих ограждающих конструкций. Эти конструкции могут состоять из нескольких слоев различных материалов, содержать как массивную, так и отражающую изоляцию, наличие которой требует присутствия воздушной прослойки между слоями алюминиевой фольги и массивной изоляции. Так как в воздушных прослойках теплообмен происходит иначе, нежели в телах твердых и сыпучих, то аналитический расчет ограждений невозможен.

Тепловизионное обследование – одно из передовых направлений неразрушающего тепловизионного контроля за состоянием ограждающих конструкций и электрооборудования. Тепловизионное обследование является эффективным способом выявления дефектов

теплоизоляции и сокращает затраты на экспертизу строительства. Тепловизионный контроль – это тепловизионная диагностика объектов в инфракрасной области спектра с длиной волны 8-14 мкм, построение температурной карты поверхности, наблюдение динамики тепловых процессов и расчет тепловых потоков. Тепловизионное обследование ограждающих конструкций зданий проводится по ГОСТ 26629-85 «Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций» и позволяет осуществлять тепловизионный контроль качества изоляции и герметичности здания, выявить участки повышенного содержания влаги и провести испытания ограждающих конструкций зданий: наружных стен, покрытий, чердачных перекрытий, перекрытий над проездами, холодными подпольями и подвалами, ворот и дверей в наружных стенах, а также оконных и балконных дверных блоков и других ограждающих конструкций, разделяющих помещения с различными температурно-влажностными условиями. Энергетическое обследование зданий и сооружений предусматривает, наряду с энергоаудитом инженерных сетей, проведение тепловизионного обследования ограждающих конструкций. Тепловизионный контроль качества теплозащиты зданий зарекомендовал себя как один из основных способов контроля состояния ограждающих конструкций в виду удобства, оперативности и наглядности методик тепловизионного обследования. Метод позволяет выявить нарушения теплозащитных ограждающих конструкций, возникшие в результате нарушения технологии изготовления строительных материалов; ошибок и нарушений при строительстве зданий; неправильного режима эксплуатации; естественного старения материалов под воздействием погодных условий. Сегодня в строительстве применяется множество новых теплоизоляционных материалов. Их использование привело к снижению теплопотерь зданий. Но это означает, что относительно небольшие дефекты теплоизоляции, могут иметь существенные последствия.

Для уменьшения теплопотерь здания требуется эффективная перепланировка, тепловизионный контроль ограждающих конструкций и документальное оформление теплоизоляции в форме акта тепловизионного обследования. Необходимо избегать недостатков, приводящих к проникновению влаги, вредной для здоровья людей. Тепловизионное обследование подтвердило свою актуальность для проектировщиков, застройщиков и пользователей. Тепловизионная диагностика предоставляет информацию, позволяющую избежать дорогостоящих ремонтных работ. Для владельца здания или страховой компании, участвующей в урегулировании вопросов, связанных с повреждением имущества, тепловизионное обследование может стать источником ценнейших сведений, тепловизионный контроль позволяет спланировать восстановительные работы и найти рациональное решение. Тепловизионное обследование показывает, что дефекты теплоизоляции здания могут привести к увеличению теплопотерь на 30-40% относительно ожидаемых значений. Тепловизионный контроль расхода энергии до и после восстановления теплоизоляции зданий по данным тепловизионного обследования также подтверждает эти результаты. По самым осторожным оценкам, эффективная тепловизионная диагностика теплоизоляции здания обеспечивает снижение энергопотребления приблизительно на 15-30%.

Возможные цели тепловизионного обследования зданий:

- Выявление скрытых дефектов теплоизоляции ограждающих конструкций методами тепловизионного контроля;
  - Определение теплопотерь здания и проверка соответствия теплоизоляции нормативам;
  - Составление энергетического паспорта здания по данным отчета тепловизионного обследования;
  - Использование результатов тепловизионного обследования в судебном процессе.
- Тепловизионное обследование зданий позволяет определить:
- Скрытые дефекты теплоизоляции или конструктивные недоработки (некачественный монтаж оконных блоков, дефекты теплоизоляции стыков между панелями, мостики холода).
  - Реальные теплопотери и сравнение их с нормативными.
  - Места возможного запотевания стен.
  - Недоработки в разводке отопительной системы, засоренность батарей.
  - Места протеканий в кровле.
  - Места прокладки труб или электрических нагревателей в обогреваемых полах.

При создании энергетического паспорта здания необходимо произвести измерение и определение ряда технических параметров здания. Одним из важнейших параметров является сопротивление теплопередаче  $R$  стен, потолочных и чердачных перекрытий.

Расчет сопротивлений теплопередаче ограждающих конструкций  $R$  является обязательной частью раздела «Энергоэффективность» проекта здания. Для наружных стен этот расчет важен не только с точки зрения определения ее конструкции, решения фасада, значений теплоэнергетических параметров здания, но и как связующее звено между архитектурно-строительным разделом и разделом «Отопление и вентиляция» рабочего проекта: по  $R$  производится расчет отопительных приборов помещений, тепловая нагрузка. Кроме того, расчет влажностного режима стены, вентилируемости воздушной прослойки навесных фасадов как одного из основных условий его функционирования также зависит от значения  $R$ . Вместе с тем, точность определения  $R$  утепленных снаружи стен, в зависимости от принятой методики расчета, может существенно отличаться.

При определении  $R$  многослойных стен при неполных данных о параметрах используемых материалов, а также с целью ускорения определения значения сопротивления теплопередаче была предложена эмпирическая формула, коэффициенты которой были получены расчетным путем с помощью пакета «Математика 4.0»

$$R = K_0 \cdot \frac{T_{\dot{a}i} - \dot{O}_{\dot{a}\delta}}{Q_{\dot{n}\delta}} \quad (1)$$

Значение  $K_0$  – поправочного коэффициента, вычисляется о формуле:

$$\hat{E}_0 = 2.68 \cdot \left( \frac{\dot{O}_{\dot{a}i}}{\dot{O}_{\dot{a}\delta}} \right)^{0.087} \cdot S^{-0.270} \cdot L^{0.469} \cdot \tau^{-0.112}$$

Где,  $S$  - площадь нагреваемой поверхности,  $L$  – толщина стены,  $\tau$  – время нагрева.

Данная формула была предложена для однослойной стены.

Необходимо адаптировать данную формулу для многослойных стен.

Для моделирования процессов теплопередаче сквозь многослойную стену была применена программа «ThermoCalc\_6L».

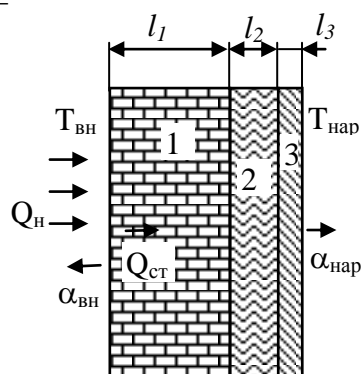


Рис. 1. Многослойная стена. 1 – кирпич, 2 – минеральная вата, 3- сайдинг (дерево).  $T_{вн}$  – температура внутреннего помещения,  $T_{нар}$  – температура наружного воздуха,  $\alpha$  - коэффициенты теплоотдачи,  $Q_n$  – величина теплового потока нагрева,  $Q_{ст}$  – величина потока проходящего через стену,  $l_1$   $l_2$   $l_3$  – толщины слоев.

Реальное сопротивление теплопередаче многослойной стены определяется по формуле;

$$R_{\dot{y}\delta\delta} = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\lambda_i}, \text{ где } n - \text{ число слоев, } l_i - \text{ толщина слоя, } \lambda_i - \text{ значение теплопроводности } i - \text{го}$$

слоя.

Практически, для того, чтобы определить сопротивление теплопередаче многослойной стены необходимо при скачкообразном изменении потока нагрева  $Q_n$  измерить тепловые потоки через время, требуемое для выхода на насыщение:

$$R_{\text{эсг}} = \frac{T_{\text{аг}} - T_{\text{гд}}}{Q_{\text{гд}}}, \quad (2)$$

где  $Q_{\text{ст}} = Q_{\text{н}} - T_{\text{вн}} \cdot \alpha_{\text{вн}}$ .

Как правило, это время превышает 10 суток.

Целью работы стало нахождение поправочного коэффициента к формуле 2, используя данные о величине потока, измеренного через сутки, после изменения температуры.

Для моделирования использованы материалы из Табл.1.

Таблица 1. Материалы стены.

| Материал                 | $\lambda$ , Вт/м·К | C, Дж/м <sup>3</sup> ·К | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> |
|--------------------------|--------------------|-------------------------|----------------------------|
| Кирпич красный           | 0,76               | 880                     | 1800                       |
| Штапельное стекловолокно | 0,056              | 840                     | 50                         |
| Сайдинг (дерево)         | 0,18               | 2300                    | 500                        |

Для расчета введены следующие данные:

$Q_{\text{н}} = 100$  Вт;

$\alpha_{\text{вн}} = 8,7$  Вт/м<sup>2</sup>·К

$\alpha_{\text{нар}} = 23$  Вт/м<sup>2</sup>·К

Значения потока и сопротивления теплопередаче приведены в Табл.2.-4.

Расчетное сопротивление теплопередаче определяется по формуле:

$$R_{\text{дгн}} = \frac{T_{\text{аг}} - T_{\text{гд}}}{Q'_{\text{гд}}}, \quad (3)$$

где  $Q'_{\text{ст}}$  – значение потока через заданный момент времени.

Таблица 2. Расчетные значения для толщин слоев  $l_1=0.5$ м,  $l_2=0.05$ м и  $l_3=0.009$ м.

| Время нагрева | $R_{\text{эфф}}$ | $Q'_{\text{ст}}$ | $R_{\text{расч}}$ | $K_1 = R_{\text{эфф}}/R_{\text{расч}}$ |
|---------------|------------------|------------------|-------------------|--|
| 10 суток      | 1,657            | 21,68            | 0,41              | 4,04                                   |
| 3 суток       |                  | 23,40            | 0,37              | 4,44                                   |
| 1 сутки       |                  | 27,0             | 0,31              | 5,347                                  |

Таблица 3. Расчетные значения для толщин слоев  $l_1=0.5$ м,  $l_2=0.1$ м и  $l_3=0.009$ м.

| Время нагрева | $R_{\text{эфф}}$ | $Q'_{\text{ст}}$ | $R_{\text{расч}}$ | $K_1 = R_{\text{эфф}}/R_{\text{расч}}$ |
|---------------|------------------|------------------|-------------------|--|
| 10 суток      | 2,550            | 21,11            | 0,43              | 5,98                                   |
| 3 суток       |                  | 23,3             | 0,38              | 6,77                                   |
| 1 сутки       |                  | 26,99            | 0,31              | 8,21                                   |

Таблица 4. Расчетные значения для толщин слоев  $l_1=0.5$ м,  $l_2=0.15$ м и  $l_3=0.009$ м.

| Время нагрева | $R_{\text{эфф}}$ | $Q'_{\text{ст}}$ | $R_{\text{расч}}$ | $K_1 = R_{\text{эфф}}/R_{\text{расч}}$ |
|---------------|------------------|------------------|-------------------|--|
| 10 суток      | 3,443            | 20,84            | 0,43              | 7,92                                   |
| 3 суток       |                  | 23,26            | 0,38              | 9,11                                   |
| 1 сутки       |                  | 26,99            | 0,31              | 11,08                                  |

Непосредственное применение формулы (1) для многослойной стенки дает некорректные результаты. Следует найти поправочные коэффициенты  $K_2 = K_1 / K_0$  к этой формуле.

Тогда формула с поправкой будет иметь вид:

$$R = \frac{K_2 \cdot R_{\text{дгн}}}{R_{\text{гд}}}, \quad (4)$$

Исходя из формулы (4) получим поправочный коэффициент, который равен  $R=3.77$  для многослойной стенки.



Как известно, повышение эффективности использования тепловой энергии становится в настоящее время одним из приоритетных направлений науки и техники, в том числе и в строительстве.

Создание современных зданий и проведение реконструкции эксплуатируемого фонда с учетом нормативных требований к их энергопотреблению возможно только при высоком качестве проектирования и производства, использовании современных материалов и технологий, а также своевременной и обязательной диагностике реального состояния вновь возводимых, эксплуатируемых и реконструируемых объектов. Это особенно актуально, так как исследования показывают, что сверхнормативно теряется до 40% энергии, расходуемой на отопление зданий.

Разработанная в последние годы нормативно-правовая база позволяет при соответствующей организации достигать качественных (нормативных) удельных показателей энергопотребления.

Одним из необходимых этапов работ на этом пути является проведение теплового контроля и определение фактических теплотехнических характеристик строительных конструкций в условиях их эксплуатации.

Как правило, обследование отдельных конструкций лишь первый этап, далее все равно приходится обследовать остальные конструкции здания. Особенно часто обращаются за обследованием плит перекрытий при увеличении нагрузки на перекрытие в результате модернизации производства, установки оборудования, перепланировки. Если увеличивается нагрузка на перекрытие, то нагрузка увеличится и на стены (каркас) и на фундаменты здания и на грунты основания, значит обследовать придется и их. А чтобы сделать выводы и прогноз работы фундаментов следует собрать нагрузку от вышележащих конструкций, для чего в худшем случае нужно выяснить состав кровли, состав пола, конструкцию стен. Так что обследовать отдельные конструкции приходится нечасто и техническое задание при этом следует составлять особенно тщательно. С другой стороны это один из способов разбить обследование на этапы. Допустим, мы выясним, что увеличение нагрузки на перекрытие невозможно, а замена или усиление его слишком дороги (мы можем предложить вам и возможные варианты усиления, и даже составить сметную документацию на работы по усилению конструкций), тогда вы можете принять решение, и не обследуя фундаменты (а это наиболее дорогая часть обследования). Обследование отдельной конструкции бывает уместно, когда нагрузка не увеличивается а деформации носят местный характер (увеличился прогиб одной из плит перекрытия, возникли трещины в одно из стеновых панелей), либо если несущая способность остальных конструкций здания заведомо выше предполагаемой нагрузки. Также можно обойтись несколькими видами работ при выяснении причин протечек кровли, стен, нарушении функционирования вентиляции, отопления, электросетей, водопровода или канализации. Если у вас такой случай, либо требуется выполнять обследование, разбивая его на отдельные этапы, то целесообразно заказать именно обследование отдельных конструкций.

Для проверки соответствия между реальными значениями термического сопротивления окон и балконных дверей и значениями, указанными в паспорте объекта целесообразно воспользоваться двумя методами или их комбинацией - натурные испытания и/или тепловизионный контроль. В этих случаях методику нормативная литература не регламентирует. Очевидно, что с точки зрения достоверности предпочтительна комбинация двух методов: при помощи натуральных испытаний, устанавливается масштаб значений приведенных термических сопротивлений, а тепловизионные термограммы показывают уже значение сопротивлений по всем фасадам здания.

Кроме того, по результатам тепловизионной съемки можно судить о степени регулировки систем отопления за счет несанкционированной установки отопительных приборов.

Важно отметить серьезность вопроса об учете влажностного состояния ограждающих конструкций. При проведении контроля в период эксплуатации здания есть возможность проследить динамику изменения влажностного состояния ограждений по сравнению с прошлым обследованием (при сдаче здания в эксплуатацию). Анализ результатов обследований позволяет оценить, насколько параметры ограждающих конструкций удовлетворяют требованиям нормативной литературы. Однако, с практической точки зрения, провести

обследование объекта (особенно жилого здания) через год или более после сдачи в эксплуатацию, довольно сложно, т.к. проведение контактных измерений в помещениях, где проживают люди, не всегда представляется возможным. Поэтому, на наш взгляд наибольшее внимание следует уделять натурному контролю влажностных характеристик ( $\alpha$ , следовательно, и теплопроводности) на этапе сдачи объекта в эксплуатацию и прогнозированию изменения этих характеристик по результатам исследований материалов в испытательных лабораториях.

Упомянутая выше методика позволяет на основании полученных реальных значений приведенного сопротивления теплопередаче определить положение точки росы, положение плоскости промерзания и оценить тепловое состояние строительной конструкции при аварийном отключении теплоснабжения (с определением максимально допустимого интервала времени отключения для проведения ремонтных работ или слива воды из системы отопления).

Последний фактор чрезвычайно важен при эксплуатации зданий. В основе технологии определения "безопасного" интервала времени отключения лежит математическая модель, описывающая процесс нестационарной теплопередачи в наружных и внутренних ограждающих конструкциях, цокольном этаже и чердачном помещении жилого дома с учетом граничных и начальных условий и внутренних источников энергии. В предлагаемой постановке задачи тепловое состояние жилого дома при возможной аварии в зимний период определяется расчетно-экспериментальным методом.

Одной из серьезных проблем, впервые решенных для описываемых методик, является определение погрешности контролируемых величин, в том числе определение зависимости значения погрешности искомой величины (выходной погрешности) от величин погрешности входных данных (входной погрешности) в реальных условиях эксплуатации объектов контроля и в условиях априорного отсутствия эталонов. Решение основано на частотном анализе задачи нестационарной теплопроводности на базе обратных дискретных преобразований Фурье и оценки результатов контроля методики математической статистики.

Анализ движения фронта замерзания (или оттаивания) влаги, содержащейся в наружных ограждениях здания, и координаты точки росы имеет большое практическое значение, так как они непосредственно связаны с вопросами долговечности ограждающих конструкций, формирования их реального теплового и влажностного режима. В зоне перемещения фронта промерзания создаются крайне неблагоприятные условия эксплуатации материала вследствие возможного чередования замерзания и оттаивания, которое постепенно приводит к снижению прочности, а в конечном счете и к разрушению конструкции, что особенно актуально для климатических зон с высокой влажностью.

Здесь следует сделать оговорку, что процесс замерзания влаги в ограждающей конструкции носит очень сложный характер. Действительно, влага в конструкции может находиться в связанном и свободном состоянии, материалы ограждения могут иметь различную структуру. Поэтому введение параметра - температура замораживания влаги в конструкции - не всегда верно, скорее надо вести разговор о вероятности замораживания. Также неоднозначны характеристики процесса конденсации, т.к. он зависит от влажности внутреннего и наружного воздуха, свойства материалов ограждающих конструкций, климата и т.д. В этом случае также уместно говорить о зоне риска.

Благодаря полученным коэффициентам возможность более правильного и корректного контроля энерго-потерь возрастает в разы и появляется возможность проводить измерения в более короткие сроки.

В экономическом отношении повышение теплоизоляции зданий необходимо каждой семье, так как из ее бюджета в скором будущем будут полностью оплачиваться все затраты на отопление квартиры.

Повышение уровня теплозащиты необходимо нашему государству, так как это снизит зависимость от энергодобывающих стран и даст возможность перераспределения потоков энергии между секторами экономики страны.

Таким образом, и государство в целом, и каждый гражданин в отдельности заинтересованы в решении проблемы энергосбережения. Необходимо только установить четкий механизм, обеспечивающий воплощение этой задачи в существующую практику строительства.

Таким образом, осуществление контроля, в особенности с использованием современных технологий, за соблюдением нормативных требований по теплозащите зданий, качеству материалов и монтажу на различных стадиях строительного производства, позволяет эффективно бороться с излишними расходами тепла и способствует дальнейшему повышению энергоэффективности зданий и сооружений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП 23-02-2003
2. СНиП II-3-79 (1998)
3. Сысоев Э.В., Чернышов А.В. Методы и системы неразрушающего контроля теплозащитных свойств многослойных строительных конструкций. М.: «Издательство Машиностроение-1», 2006. 104 с.

**Сведения об авторах:**

**Острасть А.А.:** г.Томск, магистр ТПУ, гр. 1М401.

УДК

**РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЯ ДЛИНЫ НЕМАГНИТНЫХ ПРОТЯЖЕННЫХ  
ИЗДЕЛИЙ ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ  
(DEVELOPMENT OF LENGTH METER OF NONMAGNETIC EXTENDED PRODUCTS  
WITH HELP OF EDDY CURRENT METHOD)**

Г.С. Гынгазова, Д.В. Миляев  
G. Gyngazova, D. Mylyaev

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
E-mail: Liata@sibmail.com

Приведен обзор методов измерения длины. Подробно рассмотрен вихретоковый метод измерения длины. Проведен анализ чувствительностей от вносимых сигналов. Описаны экспериментально полученные данные.

(A review of methods for length measuring. Discussed in detail eddy current method for length measuring. The analysis of the inspiration signal sensitivity. Described the experimental data obtained.)

**Ключевые слова:**

Вихретоковый метод, скоростной эффект, измерение длины, годограф.  
(Eddy current method, speed effect, length measuring, time-distance curve.)

В процессе изготовления протяженных изделий (канатов, прутков, проводов, проволоки и т.д.) требуется измерять их длину. Длина изделий контролируется как на предприятиях изготовителях, так и на предприятиях осуществляющих сбыт продукции.

В настоящее время эти измерения производятся линейными измерителями длины (рулетки, линейки, дальномеры) или с помощью фотоэлектрических и кондуктометрических преобразователей для измерения длины. Существуют так же косвенные методы измерения длины, преобразующие скорость движения изделия в длину путем ее интегрирования по времени. Все существующие измерители имеют ряд недостатков, а именно относительно малую точность и сложность измерительных преобразователей.

В данной работе представляется использование вихретокового преобразователя, с помощью которого измеряется скорость движения и длина изделий.

Рассмотрим для сравнения характеристики приборов, реализованных на различных методах измерения длины и скорости:



*1) Измеритель длины, реализованный на корреляционном методе «Измеритель R3»*

Назначение: Измерение длины и скорости горячего проката для систем учета.

Альтернатива лазерным доплеровским измерителям скорости.

Диапазон измеряемых скоростей -  $\pm 10$  м/с

Минимальная измеряемая скорость – 0,5 м/с.

Температура проката – 550...1200°C

Точность измерения скорости – 1%

Точность измерения длины проката – 0,15%

(с помощью барьерных датчиков –  $\pm 10$  мм)

Расстояние от измерителя до проката – 1600, 2300 мм

Диапазон изменения расстояния до проката – 600 мм  
Частота измерений – 100 раз в секунду  
Интерфейсы – RS232, RS485, дискретный выход – аналог сигналов импульсного датчика

Технические характеристики:

2) *Измеритель длины, реализованный на электромеханическом методе «VETTER»*



**Характеристики измерителя длины кабеля VETTER**

Диаметр измеряемого кабеля, мм 25-110  
Погрешность 1,0 %  
Механический счетчик со шкалой 9999,99 м  
Диаметр измерительного колеса, мм 500  
Вес, кг 13,00

3) *Измеритель длины, реализованный на кондуктометрическом методе «CLM-33»*



Измеритель длины кабеля CLM-33 производится корейской компанией FINEST. Прибор предназначен для измерения длины кабеля с сердечником из алюминия или меди. Принцип измерения основан на высокоточном измерении сопротивления.

Прибор измеряет длину кабеля с площадью сечения от 0.15 мм<sup>2</sup> до 240 мм<sup>2</sup>.  
Максимальная длина измеряемого кабеля составляет 30000 м.

Характеристики прибора CLM33

- |                               |   |
|-------------------------------|---|
| • Диапазон измерений          | 100...30000м                                |
| • Диапазон сечений кабеля     | 0.15мм <sup>2</sup> .....240мм <sup>2</sup> |
| • Погрешность сопротивлений   | +/-2% от читаемой величины + 3              |
| • Диапазон                    | 0...65 Ом с разрешением 1мОм                |
| • Диапазон рабочих температур | 0...40С                                     |
| • Влажность                   | 20%...80% RH                                |
| • Размеры                     | 47x100x203мм                                |
| • Вес                         | 587г  |

**Обзор методов измерения длины:**

Электромеханический метод измерения длины и скорости.

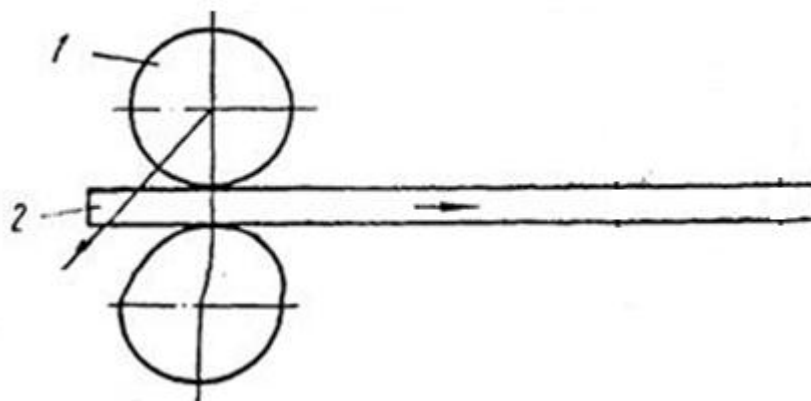


Рис.1. Электромеханический измеритель длины: 1 – прокатные валики; 2 – изделие.

Принцип работы электромеханических измерителей длины заключается в следующем. Измерительный цилиндрический ролик, вращаемый на оси, прижимается к изделию и обкатывает его при поступательном движении. С роликом жестко связан импульсный датчик, который выдаст определенное число импульсов на один оборот ролика. Цена импульса может быть определена по следующей формуле [3]:

$$k = \pi D n = 2 \pi r n$$

где  $D$  – диаметр измерительного ролика;

$n$  – число импульсов на один оборот импульсатора;

$\mu$  – передаточное отношение между роликом и импульсатором.

Подсчитав число импульсов  $m$ , можно определить длину изделия  $L$ :

$$L = km$$

где  $k$  – цена импульса;

$m$  – число импульсов.

Достоинства:

простота;

относительная надежность.

Недостатки:

наличие механических деталей;

проскальзывание ролика по изделию;

стирание мерного колеса.

Бесконтактные методы измерения длины и скорости протяженных изделий целесообразно использовать только в тех случаях, когда по тем или иным причинам невозможно использовать контактный электромеханический метод. Например, при измерении длины оптоволокна и оптоволоконных кабелей невозможно применять контактный метод из-за хрупкости объекта измерения. А при измерении длины и скорости стальных канатов, проката, арматуры и т.п., контактный метод непригоден, так как мерные колеса не выдерживают нагрузок возникающих при производстве этих изделий и быстро изнашиваются. Также электромеханический метод измерения малоприменим при движении измеряемого объекта с большими скоростями из-за своей инерционности. Приборы, использующие бесконтактные схемы измерения, как правило, на порядки более сложны, дороги и потенциально менее надежны хотя зачастую и обеспечивают хорошие метрологические характеристики.

#### Лазерный доплеровский измеритель длины и скорости

Принцип измерения лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС) заключается в следующем: лазерный пучок расщепляется светоделительной призмой на 2 луча, которые, пересекаясь на поверхности контролируемого объекта, образуют интерферирующую картину с периодом «д». Излучение, рассеянное неоднородностями на поверхности объекта, собирается приемной оптикой и преобразуется фотоприемным устройством в электрический сигнал, частота которого пропорциональна скорости движения объекта [3]:

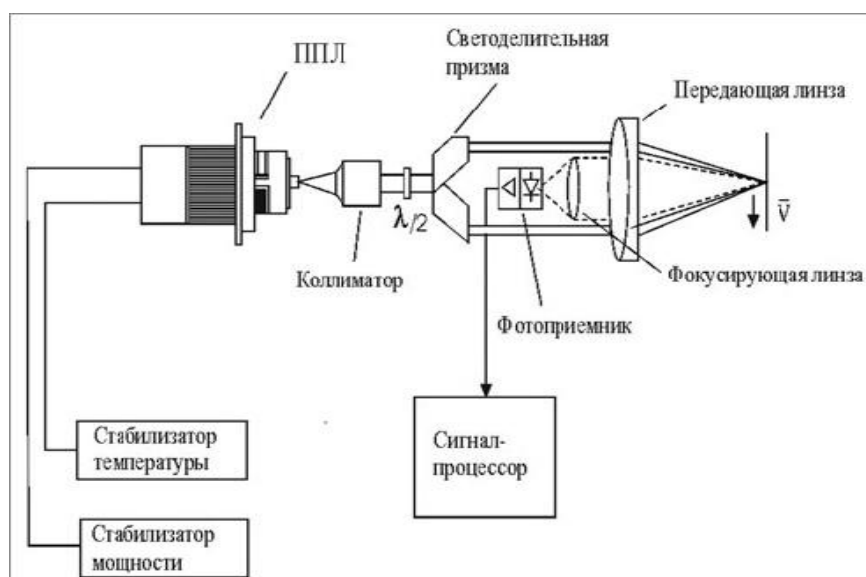


Рис.2. Оптическая схема лазерного датчика ЛДИС (ППЛ - полупроводниковые лазеры).

$$f = \frac{v}{d} = \frac{2 \cdot v \cdot \sin\left(\frac{Q}{2}\right)}{\lambda}$$

где  $f$  – выходная частота лазерного датчика;  
 $v$  – скорость объекта;  
 $Q$  – угол между лазерными лучами;  
 $\lambda$  – длина волны лазера.

Таким образом, измеряя выходную частоту лазерного датчика, можно определить скорость и, соответственно, длину движущегося объекта:

$$v = \frac{f \cdot \lambda}{\sin\left(\frac{Q}{2}\right)} = K_{sp} \cdot f,$$

где  $K_{sp}$  – градуировочный коэффициент прибора;  
 $\lambda$  – длина волны;  
 $f$  – выходная частота лазерного датчика;

$$L = \int_0^t v(t) dt$$

где  $L$  – длина объекта;  
 $t$  – время измерения.

Достоинства:

Бесконтактный метод;  
 Отсутствие проскальзывания ролика;  
 Измерение хрупких объектов;  
 Высокая точность.

Недостатки:

Высокая стоимость;  
 Ограничения по скорости;  
 Невозможность определения направления движения;  
 Проблема контакта с объектом.

#### Корреляционный метод измерения длины.

Сущность корреляционного метода измерения линейной скорости (рис. 3) заключается в следующем. На поверхности металла, движущегося со скоростью  $v$  при помощи двух

осветителей  $L_1$  и  $L_2$  с линейными нитями накала через оптическую систему проектируются два ярких резких световых штриха, оси которых перпендикулярны направлению движения полосы. Штрихи расположены вдоль по направлению прокатки на фиксированном расстоянии один от другого.

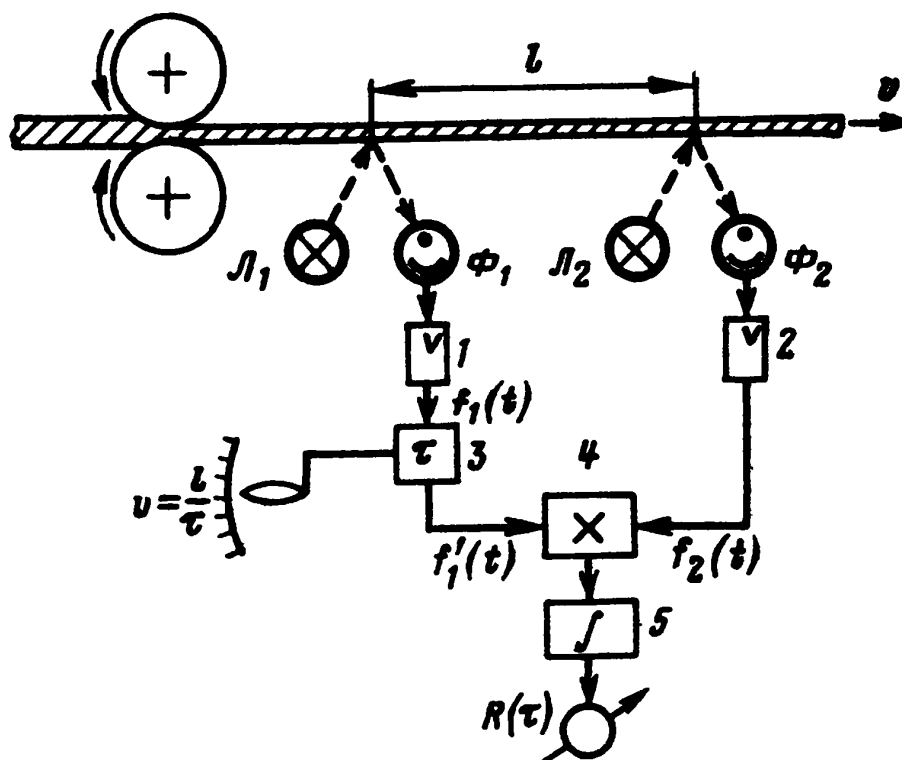


Рис.3. Схема корреляционного измерителя длины.

Вследствие различных структурных неоднородностей металла, наличия на поверхности металла трещин, пятен и окалины яркость штрихов изменяется. Изображение штрихов воспринимается приемной оптической системой и проектируется на катоды двух фотоэлементов  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , с которых снимаются сигналы, пропорциональные яркости каждого из штрихов. Усилители  $1$  и  $2$  усиливают сигналы до уровня, достаточного для нормальной работы коррелятора, состоящего из блока регулируемого запаздывания  $3$ , множительного устройства  $4$  и интегратора или сглаживающего фильтра  $5$ . Блок регулируемого запаздывания, включенный в канал первого сигнала, может быть выполнен, например, в виде магнитной ленты или магнитного барабана с подвижной читающей головкой.

Так как второй штрих смещен относительно первого на расстояние  $l$ , то сигнал  $f_1(t)$ , характеризующий яркость первого штриха, повторится на втором штрихе с некоторым транспортным запаздыванием  $T_T$ , прямо пропорциональным расстоянию между штрихами  $l$  и обратно пропорциональным скорости движения проката  $v$ :

$$T_T = \frac{l}{v}$$

Второй сигнал  $f_2(t)$  через интервал времени  $T_T$  по форме будет близок к первому сигналу. Иначе говоря,

$$f_2(t) = f_1(t - T_T)$$

Выходной сигнал коррелятора максимален при  $T = T_T$ , т. е. при равенстве введенного регулируемого запаздывания  $T$  транспортному запаздыванию  $T_T$  сигнала второго фотоэлемента. Изменяя  $T_T$  достигают максимального показания индикатора и тем самым обеспечивают условие  $T = T_T$ . Учитывая, что при фиксированном  $l$  транспортное запаздывание  $T_T$  однозначно связано со скоростью  $v$ , можно определить скорость движения металла:

$$v = \frac{l}{T_T} = \frac{l}{T}$$

Для определения длины необходимо проинтегрировать скорость по времени:



$$L = \int_0^t v(t) dt$$

Существенным недостатком измерителя скорости полосы, использующего корреляционный метод, является весьма малая надежность, необходимость тщательной наладки и частых периодических подналадок отдельных узлов. [4]

Вихрековый метод измерения длины и скорости.

Вихрековый метод основан на использовании скоростного эффекта, который заключается в том, что при движении изделия в переменном электромагнитном поле возникают дополнительные вихревые токи за счет движения. Это приводит к искажению вихревых токов, наводимых переменным электромагнитным полем. Скоростной эффект является мешающим фактором при ЭМ контроле, а при измерении скорости и длины можно использовать методы отстройки от скоростного эффекта.

Данный метод нашел широкое применение для контроля качества продукции и измерения различных геометрических и электрофизических параметров объектов в процессе их движения относительно ВТП.

При контроле проходными ВТП движущихся цилиндрических протяженных объектов (проводов, труб прутков и др.) представляет практический интерес анализ вносимых параметров проходных наружных преобразователей (ПНП).

Ниже приведено выражение для вносимой ЭДС [1]:

$$\dot{E}_{\text{вн}} = -j\mu_0 \dot{I} a^2 \omega \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\mu_r |\lambda| J_0(|\lambda|R) J_1(qR) - q J_1(|\lambda|R) J_0(qR)}{\mu_r |\lambda| K_0(|\lambda|R) J_1(qR) + q K_1(|\lambda|R) J_0(qR)} \cdot K_1^2(|\lambda|a) e^{-j\lambda z} d\lambda$$

где  $q^2 = \lambda^2 - j\mu_a \lambda v_z \sigma + j\omega \mu_a \sigma = \sqrt{\lambda^2 - k^2 (1 - \frac{\lambda v}{\omega})}$ ,  $\beta = R \sqrt{\omega \cdot \mu_a \cdot \sigma}$  – обобщенный

параметр;  $\eta_v = v_z \cdot a \cdot \mu_0 \cdot \sigma$

$J_n$  – функция Бесселя первого рода n-го порядка;  $K_n$  – модифицированная функция Бесселя второго рода n-го порядка;  $a$  – радиус возбуждающего и измерительного витков;  $R$  – радиус объекта (наружный для ПНП и внутренний для ПВП);  $z$  – расстояние между плоскостями возбуждающего и измерительного витков;  $v_z$  – скорость движения контролируемого объекта вдоль оси ВТП;  $\lambda$  – переменная интегрирования;  $\sigma$  – электрическая проводимость

Причем функции  $K_n(|\lambda|R)$ ,  $J_n(|\lambda|R)$  – описывают воздействие вихревых токов;  $J_n(qR)$  – отвечают за влияние скоростного эффекта.

Если менять  $\lambda$ , то можно определить вносимую ЭДС от обобщенного параметра, включая размеры объекта контроля, частоту и электрические свойства материала. При различных  $\lambda$  скоростной эффект проявляется по разному. Эта ЭДС позволяет определить вихревые токи, а так же скоростной эффект при различных обобщенных параметрах, а зная скорость можно определить длину.

Зная ЭДС можно определить скорость, а затем проинтегрировать ее для получения длины контролируемого объекта.

Достоинства:

- бесконтактность измерения;
- на сигналы преобразователя практически не влияют влажность, давление и загрязненность газовой среды, радиоактивные излучения, загрязнение поверхности объекта контроля непроводящими веществами;

- простота конструкции преобразователя, его надежность и высокий срок службы

Недостатки:

- необходимость отстройки от мешающих параметров;
- нелинейность характеристик преобразования (а именно, нелинейная связь между ЭДС и скоростью), соответственно, для линеаризации требуется сужение диапазона измерения скорости.

Известные вихрековые преобразователи (ВТП) применяют для контроля и измерения различных параметров технологических процессов в информационно-измерительных системах. Однако для измерения скорости вихрековый метод недостаточно исследован. Особенно, это проявляется при контроле различных движущихся изделий – ферромагнитных и немагнитных, имеющих различную форму и длину.

*Теоретические исследования применительно к измерению скорости*

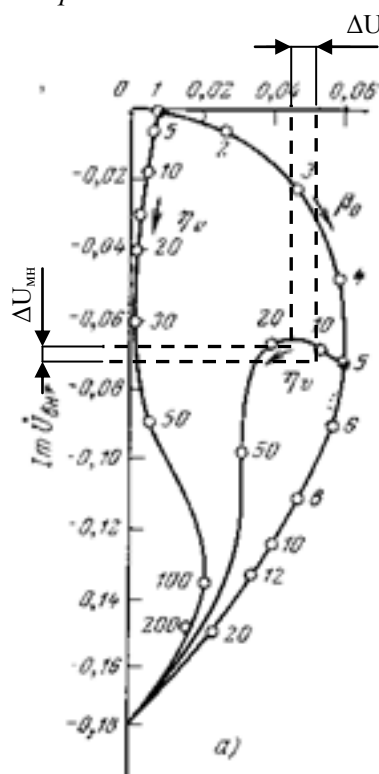


Рис.4. Годографы  $U_{вн}(\eta_v, \beta_0)$  – относительного вносимого напряжения проходного наружного ВТП при движении неферромагнитного цилиндрического объекта: а)  $R^*=0,6, z^*=0$ .

Рассмотрим проявление скоростного эффекта применительно к круглым проходным катушкам при движении немагнитного изделия с круглыми сечениями и анализе чувствительностей.

При измерении скорости ВТП можно использовать не только вносимую ЭДС, но и ее отдельные составляющие: Вещественную и мнимую составляющие, их модуль, отношение этих величин, сдвиг фаз, добротность и др. В данной работе исследуется чувствительность по мнимой, вещественной составляющим их модулю и фазе. В теоретическом плане используется не расчет вносимой ЭДС от скоростного эффекта, а годограф для ВТП, имеющийся в литературе. На рис.4 представлен годограф относительного вносимого напряжения проходного наружного ВТП при движении неферромагнитного цилиндрического объекта: а)  $R^*=0,6, z^*=0$ . Годограф – это изменение в системе  $E_{вещ}/E_{xx}$  по оси  $x$ , и  $E_{мн}/E_{xx}$  по оси  $y$  при различных значениях параметров объекта, частоты, скорости и т.д.

При контроле круглыми проходными ВТП движущихся цилиндрических объектов (проводов, труб прутков и др.) представляет практический интерес анализ вносимых параметров проходных наружных преобразователей (ПНП).

Для выбора метода измерения и построения структурной схемы необходимо определить чувствительности от скорости по вещественной составляющей, мнимой составляющей, модуля обеих составляющих и по фазе.

Общие формулы чувствительности от изменения скорости имеют вид:

$$S = \frac{\left| \frac{E_{i1} - E_{i2}}{E_{i1}} \right| \cdot 100\%}{\Delta v}, \quad S = \frac{\left| \frac{E_1 - E_2}{E_1} \right| \cdot 100\%}{\Delta v}$$

формула расчета чувствительности для мнимой и вещественной составляющей ЭДС.

$$S = \frac{\left| \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_1} \right| \cdot 100\%}{\Delta v}, \quad \varphi = \arctg \frac{E_i}{E}$$

формула расчета чувствительности фазы сигнала от изменения скорости

$$E_m = \sqrt{E_i^2 + E^2}$$

$$S = \frac{\left| \frac{E_{m1} - E_{m2}}{E_{m1}} \right|}{\Delta v} \cdot 100\%$$

формула расчета чувствительности модуля мнимой и вещественной составляющей ЭДС.

По полученным данным построены графики зависимости изменения чувствительности от изменения скорости.

Таблица 1. Расчет чувствительности

| m | v* | Δv    | SEi   | SE     | Sfi    | SEm    |
|---|----|-------|-------|--------|--------|--------|
| 5 | 0  | 0     |       |        |        |        |
|   | 10 | 6,67  | 1,06  | 2,306  | 0,8390 | 1,561  |
|   | 20 | 13,33 | 0,00  | 3,543  | 2,2084 | 1,394  |
|   | 30 | 20    | 1,82  | 2,498  | 1,7256 | 0,768  |
|   | 40 | 26,67 | 2,43  | 0,428  | 0,9667 | 1,828  |
|   | 50 | 33,33 | 1,05  | 0,440  | 0,2623 | 0,977  |
| 1 | 0  | 0     |       |        |        |        |
|   | 10 | 6,67  | 0     | 2,998  | 0      | 41,979 |
|   | 20 | 13,33 | 8,68  | 1,874  | 1,551  | 15,879 |
|   | 30 | 20    | 10,99 | 2,283  | 0,772  | 10,002 |
|   | 40 | 26,67 | 6,35  | 2,998  | 0,228  | 4,352  |
|   | 50 | 33,33 | 1,87  | 14,992 | 0,006  | 1,874  |

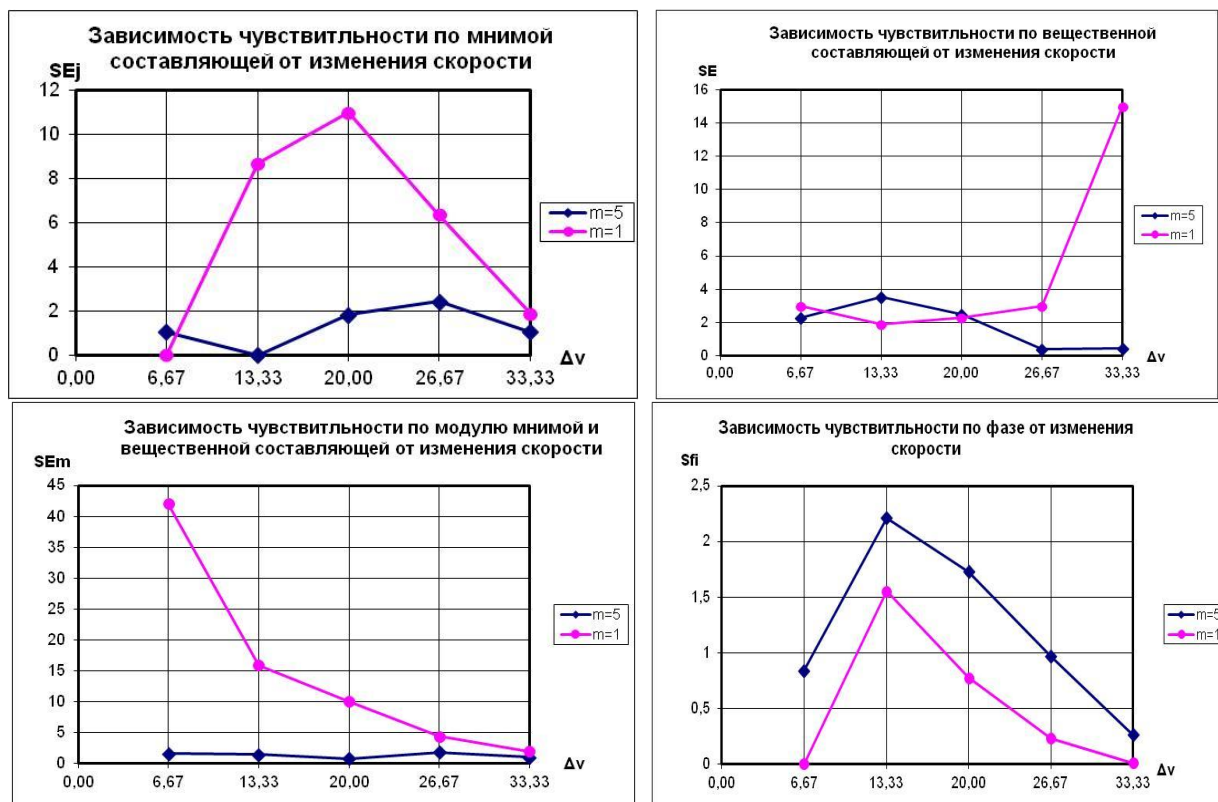


Рис.5 Графики зависимостей чувствительности мнимой и вещественной составляющей, их модуля и фазы сигнала от изменений скорости.

Для измеряемого параметра устройство должно иметь линейную зависимость. Графики зависимости, которые наиболее подходят под данное условие реализуется фазовым методом,

т.к. разделив данный график на промежутки и аппроксимируя их получают линейные зависимости, имеющие одинаковые коэффициенты передачи. Так же по данному графику видно, что фазовый метод меньше всего зависит от частоты.

Вихретоковый метод контроля, измерения и диагностики применяется в приборах для контроля различных физических величин.

Это связано с преимуществами вихретокового контроля, такими как высокая скорость контроля, его бесконтактность, высокая чувствительность, высокая надежность и производительность первичных преобразователей и их дешевизна.

В связи с тем, что все больше применяются канаты из немагнитных металлов, возникает потребность в измерении длины изделий с высокой точностью. В настоящее время для измерения применяются различные физические явления, которые, как правило, используют корреляционные методы измерения.

В данной работе рассматриваются теоретические основы применения вихретокового метода и его экспериментальное подтверждение.

Из литературных источников о вихретоковом методе имеются математические выражения, которые отражают зависимость входных параметров преобразователя от параметров изделия скорости.

На рис.1 приведен годограф относительного вносимого напряжения проходного наружного вихретокового (трансформаторного) преобразователя при движении неферромагнитного цилиндрического объекта. И здесь же приведены годографы скоростного эффекта для двух обобщающих параметров  $\beta=1$ ,  $\beta=5$ .

Из этих графиков определяются составляющие выходных напряжений при различных скоростях. На графиках рис.2 показаны зависимости мнимой, вещественной составляющих от скорости, а так же зависимость изменения фазы сигнала от скорости.

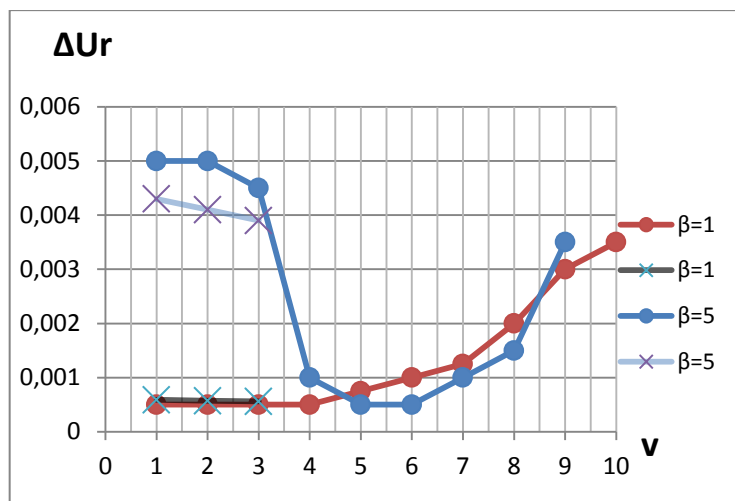
При различных скоростях данные составляющие изменяются как видно из таблицы 2, теоретически рассчитанные по графику рис. 1.

Таблица 2 . Расчет напряжений (мнимой и вещественной составляющих) и фазы от скорости

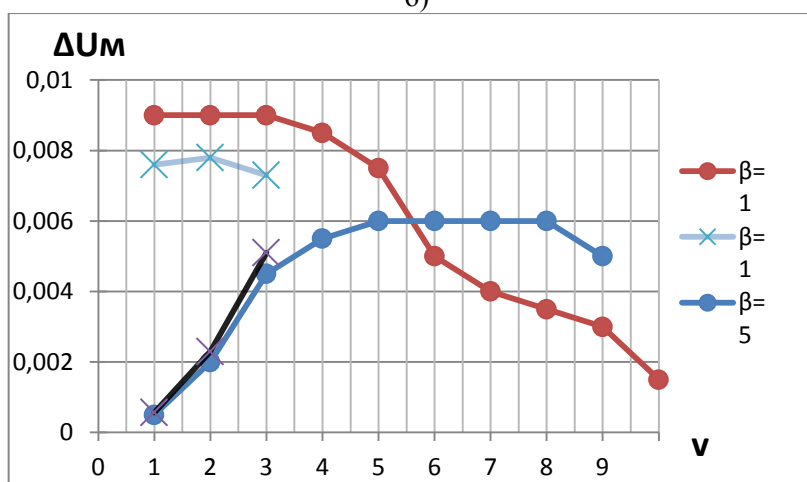
|  | $\beta=5$ |      |                             |                             |               |  | $\beta=1$ |      |                             |                             |               |
|--|-----------|------|-----------------------------|-----------------------------|---------------|--|-----------|------|-----------------------------|-----------------------------|---------------|
|  | v         | v*   | $\frac{\Delta U_r}{U_{xx}}$ | $\frac{\Delta U_m}{U_{xx}}$ | $\Delta \phi$ |  | v         | v*   | $\frac{\Delta U_r}{U_{xx}}$ | $\frac{\Delta U_m}{U_{xx}}$ | $\Delta \phi$ |
|  | 0         | 0    |                             |                             |               |  | 0         | 0    |                             |                             |               |
|  | 1         | 9,7  | 0,0045                      | 0,002                       | 0,418         |  | 1         | 9,7  | 0,0005                      | 0,009                       | 1,515         |
|  | 2         | 19,4 | 0,0055                      | 0,0015                      | 0,266         |  | 2         | 19,4 | 0,0005                      | 0,009                       | 1,515         |
|  | 3         | 29,1 | 0,004                       | 0,0045                      | 0,844         |  | 3         | 29,1 | 0,0005                      | 0,009                       | 1,515         |
|  | 4         | 38,8 | 0,001                       | 0,006                       | 1,406         |  | 4         | 38,8 | 0,0005                      | 0,0085                      | 1,512         |
|  | 5         | 48,5 | 0,0005                      | 0,0055                      | 1,480         |  | 5         | 48,5 | 0,00075                     | 0,0075                      | 1,471         |
|  | 6         | 58,2 | 0,0005                      | 0,006                       | 1,488         |  | 6         | 58,2 | 0,001                       | 0,005                       | 1,373         |
|  | 7         | 67,9 | 0,001                       | 0,006                       | 1,406         |  | 7         | 67,9 | 0,00125                     | 0,004                       | 1,268         |
|  | 8         | 77,6 | 0,0015                      | 0,008                       | 1,385         |  | 8         | 77,6 | 0,002                       | 0,0035                      | 1,052         |
|  | 9         | 87,3 | 0,0035                      | 0,004                       | 0,852         |  | 9         | 87,3 | 0,003                       | 0,003                       | 0,785         |

Согласно таблице 2 построены графики:

а)



б)



в)

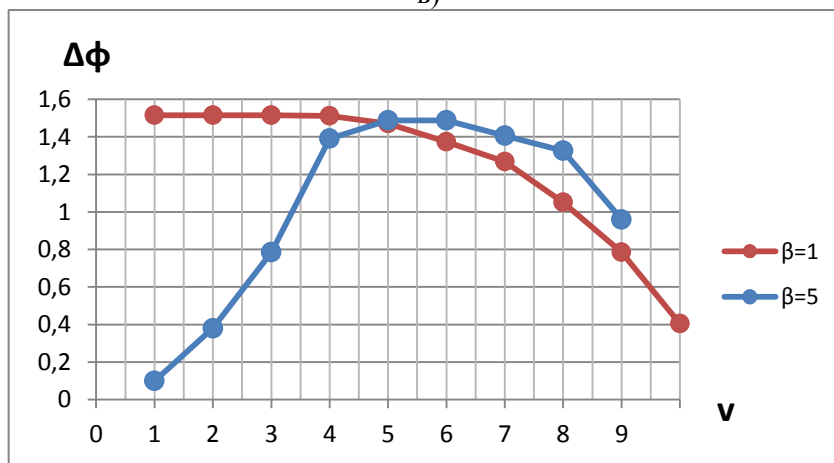


Рис.6. Зависимость вещественной (а), мнимой (б) составляющих и фазы (в) сигнала от скорости. Крестиками (а,б) указаны экспериментально полученные данные, а точками - теоретические.

Для проведения полученных теоретических данных были проведены экспериментальные исследования ВТП для двух годографов скоростей. С целью проведения эксперимента необходимо устройство для создания скоростей. Организация высоких скоростей представляет определенную трудность.

В данном случае использовалось простейшее устройство, его конструкция представлена на рис. 3.

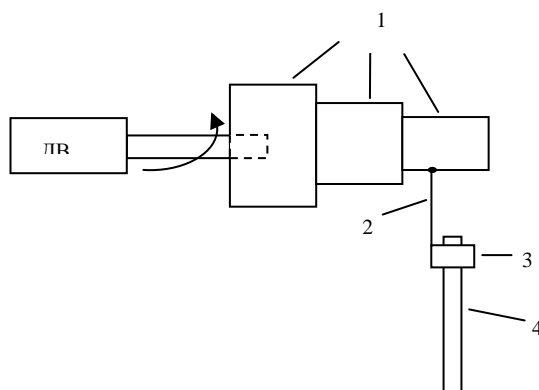


Рис.7 Намоточное устройство. ДВ – синхронный двигатель; 1 – цилиндрические насадки разных диаметров; 2 – намоточная нить; 3 – вихревой преобразователь; 4 – объект контроля (шток, стержень).

Данное устройство представляет собой синхронный двигатель, вращающийся с постоянной скоростью и прикрепленный к специальным цилиндрическим насадкам различного диаметра. Последовательно к этим насадкам прикрепляют объект контроля (шток) с помощью намоточной нити. При вращении двигателя насадки начинают вращаться, перемещая шток, ВТП в свою очередь закреплен не подвижно.

Таким образом, для создания данного устройства взят синхронный двигатель со скоростью вращения 500 об/мин, к этой дрели прикрепили 3 насадки диаметрами, взятыми из расчетной таблицы 2. Все данные в таблице рассчитаны по формуле:

$$D = \frac{v \cdot 60 \cdot 1000}{\pi \cdot n}$$

Таблица 2. Расчет диаметров для насадок двигателя

|           |      |      |       |
|-----------|------|------|-------|
| v, м/с    | 1    | 2    | 3     |
| n, об/мин | 500  |      |       |
| D, мм     | 38,2 | 76,4 | 115,6 |

Каждый диаметр соответствует определенной скорости движения преобразователя по объекту контроля. При имеющихся диаметрах колец и скорости вращения двигателя обеспечиваются соответствующие скорости движения преобразователя по объекту контроля.

Вторым этапом разработки измерителя длины необходимо исследовать мнимую и вещественную составляющую ЭДС при движении объекта контроля. Для этого необходимо собрать установку, показанную на рис.8.

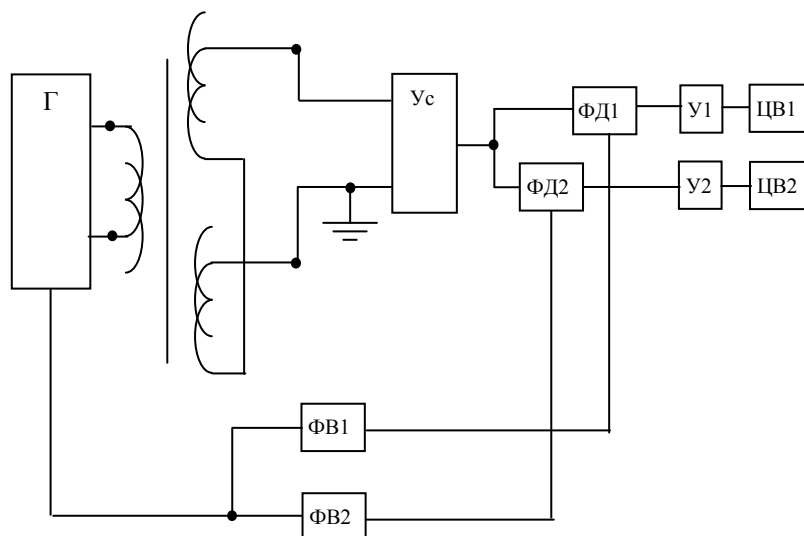


Рис.8 Схема устройства определения мнимой и вещественной составляющей ЭДС.

Данная схема работает по следующему принципу, с двух катушек включенных встречно подается напряжение на усилитель, так как разность напряжений между этими катушками больше, чем полезный сигнал. Затем с генератора на фазовращатели подается опорный сигнал и сигнал, смещенный на  $90^\circ$  относительно опорного. Далее сигналы с фазовращателей поступают фазовые детекторы, затем через усилитель на цифровые вольтметры, на одном из которых отображается мнимая составляющая, а на другом - вещественная.

Как видно из графиков информативными параметрами являются мнимая и вещественная составляющая ЭДС. Так же можно сделать вывод, что при увеличении скорости мнимая составляющая ЭДС уменьшается, так как увеличивается мешающий сигнал, т.е. вещественная составляющая. Таким образом, можно сказать, что измерение лучше проводить на меньших скоростях.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Герасимов В.Г., Ключев В.В., Шатерников В.Е. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий. - М.: Энергоатомиздат, 1983. – 272 с.
2. Лещенко И.Г., Винокуров Б.Б. Методы измерения неэлектрических величин: учебное пособие. - Томск: изд-во ТПИ, 1984. - 57 с.
3. Редько В.В, Федоров Е.М . Методы и средства контроля в кабельной промышленности: сборник методических указаний по выполнению лабораторных работ по программе магистерской подготовки. - Томск: изд-во ТПУ, 2007.- 55 с.
4. Пивоваров Л.В. Индукционные измерители линейной скорости и длины. – М.: «Энергия», 1972. – 80 с.

#### **Сведения об авторах:**

**Гынгазова Г.С.:** г.Томск, магистр ТПУ, гр. 1М401.

**Миляев Д.В.:** к.т.н., доцент кафедры Информационно-измерительной техники Томского политехнического университета.

УДК 620.9: 621.311

**«РЕЛЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ» И ОДНОПРОВОДНАЯ ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ  
(«RELAY APPROACH» AND SINGLE LINE ENERGY TRANSFER)**

М. Г. Григорьев, Г.В. Вавилова  
M. Grigor'ev, G. Vavilova

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
г. Томск  
E-mail: Mishatpu@sibmail.com

В статье приведен материал из истории про Николу Тесла, рассмотрены возможные способы передачи энергии без проводов или с помощью одного провода, представлена схема трансформатора Тесла и рассмотрены возможности ее использования в энергетике и медицине. Рассмотрен прибор, сделанный на основе открытия нового физического явления: передачи энергии индуктивностей через магнитные моменты вещества, находящегося в окружающем пространстве. Проведены некоторые эксперименты, связанные с однопроводной передачей энергии и анализ расчетов на основе этих экспериментов.  
(The article contains material from the history of Nikola Tesla, discussed possible ways to transfer energy wirelessly or through one wire, the scheme of Tesla transformer and the possibilities of its use in energy and medicine. Considered the instrument, made on the basis of opening a new physical phenomenon: the transfer of energy through the magnetic moments of the inductance of a substance in the environment. Conducted some experiments related to the single-energy transfer and analysis of the calculations on the basis of these experiments.)

**Ключевые слова:**

Трансформатор Тесла, качер, однопроводная передача энергии, регулировка напряжения, резонансный трансформатор, искровой промежуток.  
(Tesla transformer, Kacher, single-wire transmission of energy, regulation of the voltage resonant transformer, spark gap.)

Передачу электроэнергии по одному проводу демонстрировал еще Николай Тесла в 1892 году в Лондоне, а в 1893 г. в Филадельфии. Как он это делал, неизвестно. Часть записей Теслы сгорела, остальные зашифрованы. Однако опыт - высший суд наших размышлений. Очевидно, трудности беспроводной передачи энергии пропорциональны передаваемому количеству ее. Ведь даже передача большого количества энергии по проводам уже представляет собой настолько сложную задачу, что для ее решения требуются предельные возможности техники. Но именно трудности проводной передачи заставляют искать пути отказа от нее, исходя из диалектического закона отрицания.

Выходец из Хорватии Никола Тесла является самым загадочным ученым 20 века. Подарив человечеству генератор переменного тока он еще при жизни ушел в «андеграунд» и заработал славу «сумасшедшего ученого». В отличие от Эдисона, который был скорее бизнесменом, чем ученым (кстати, Тесла какое-то время работал у Эдисона, но со временем их взгляды разошлись и они перестали работать вместе, Никола Тесла был человеком, для которого наука и знание стояли впереди коммерческой выгоды.

Фантазия этого гения все больше уводила его в сторону от проторенной научной колеи. Карьера и признание Тесле не волновали. Показательным является история, когда Тесла взялся на деньги банкира Моргана строить башню трансатлантической связи. Вместо этого ученый решил построить установку, которая смогла бы обеспечивать всю округу бесплатным электричеством без проводов. В 1899 Тесла публично продемонстрировал лампы и двигатели, работающие на высокочастотном токе без проводов. Понятное дело, что инвесторам такая альтруистическая новация сильно не понравилась.

Кроме того, пущенная на полную мощность установка Теслы извергала молнии в небо, вокруг экспериментальной башни пылал шар света диаметром в 30 метров и в радиусе нескольких миль наблюдались загадочные световые и электрические эффекты, а затем



установка сожгла ближайшую трансформаторную станцию, оставив весь район без электричества.

Когда Tesla работал под Нью-Йорком, то к нему не раз выезжала полиция по жалобам соседей, от загадочных опытов Теслы все здания в радиусе километра начинали дрожать как при землетрясении.

Tesla демонстрировал и вещи, которые были далеко за гранью понимания современного человека. Например, в подтверждении своей теории о существовании эфира Tesla публично модернизировал автомобиль, заменив двигатель внутреннего сгорания электромотором и маленькой загадочной «коробкой Теслы» (Tesla Box), питающим электричеством «из эфира» авто. Автомобиль ездил несколько дней без всяких видимых внешних поступлений энергии. Tesla также утверждал, что разгадал загадку телепортации и, по слухам, упорно работал над установкой-генератором для мгновенного перемещения объектов через эфир.

Если вы слышали об эксперименте «Филадельфия», якобы проведенном в конце 2 мировой войны американцами и случайно приведшему к телепортации военного корабля, то вы в курсе что на судне так же использовались разработки Tesla, правда их пытались применить для других целей: сделать невидимым корабль для радаров противника.

Трансформатор Тесла, также катушка Тесла — устройство, изобретённое Николой Теслой и носящее его имя. Является резонансным трансформатором, производящим высокое напряжение высокой частоты. Прибор был заявлен патентом США № 568176 от 22 сентября 1896 года, как «Аппарат для производства электрических токов высокой частоты и потенциала»[1].

Работу резонансного трансформатора можно объяснить на примере обыкновенных качелей. Если их раскачивать в режиме принудительных колебаний, то максимально достигаемая амплитуда будет пропорциональна прилагаемому усилию. Если раскачивать в режиме свободных, резонансных колебаний, то при усилиях равных с принудительными колебаниями, максимальная амплитуда вырастает многократно.

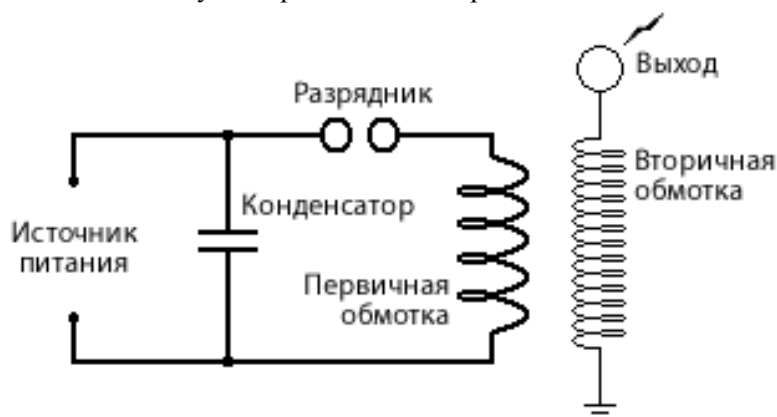


Рис.1. Схема простейшего трансформатора Тесла.

Простейший трансформатор Тесла состоит из двух катушек — первичной и вторичной, а также разрядника (прерывателя, часто встречается английский вариант Spark Gap), конденсатора, тороида (используется не всегда) и терминала (на схеме показан как «выход»).

Первичная катушка обычно содержит от единиц до нескольких десятков витков провода большого диаметра или медной трубки, а вторичная около 1000 витков провода меньшего диаметра. Первичная катушка может быть плоской (горизонтальной), конической или цилиндрической (вертикальной). В отличие от обычных трансформаторов, здесь нет ферромагнитного сердечника. Таким образом, взаимдукция между двумя катушками гораздо меньше, чем у трансформаторов с ферромагнитным сердечником. Первичная катушка вместе с конденсатором образует колебательный контур, в который включён нелинейный элемент — разрядник (искровой промежуток).

Разрядник, в простейшем случае обыкновенный газовый, представляет собой два массивных электрода с регулируемым зазором. Электроды должны быть устойчивы к

протеканию больших токов через электрическую дугу между ними и иметь хорошее охлаждение.

Вторичная катушка также образует колебательный контур, где роль конденсатора, главным образом, выполняют ёмкость тороида и собственная межвитковая ёмкость самой катушки. Вторичную обмотку часто покрывают слоем эпоксидной смолы или лака для предотвращения электрического пробоя.

Терминал может быть выполнен в виде диска, заточенного штыря или сферы и предназначен для получения предсказуемых искровых разрядов большой длины.

Таким образом трансформатор Тесла представляет собой два связанных колебательных контура, что и определяет его замечательные свойства и является главным его отличием от обычных трансформаторов. Для полноценной работы трансформатора эти два колебательных контура должны быть настроены на одну резонансную частоту. Обычно в процессе настройки подстраивают первичный контур под частоту вторичного путём изменения ёмкости конденсатора и числа витков первичной обмотки до получения максимального напряжения на выходе трансформатора.

Выходное напряжение трансформатора Тесла может достигать нескольких миллионов вольт. Это напряжение в частоте минимальной электрической прочности воздуха способно создавать внушительные электрические разряды в воздухе, которые могут иметь многометровую длину. Эти явления очаровывают людей по разным причинам, поэтому трансформатор Тесла используется как декоративное изделие.

Никола Тесла использовал трансформатор для генерации и распространения электрических колебаний, направленных на управление устройствами на расстоянии без проводов (радиуправление), беспроводной передачи данных (радио) и беспроводной передачи энергии. В начале XX века трансформатор Тесла использовался в медицине. Пациентов обрабатывали слабыми высокочастотными токами, которые протекая по тонкому слою поверхности кожи, не причиняли вреда внутренним органам, оказывая «тонизирующее» влияние на организм.

Неверно считать, что трансформатор Тесла не имеет широкого практического применения. Он используется для поджига газоразрядных ламп и для поиска течей в вакуумных системах. Также, он изготавливается многими любителями высоковольтной техники ради сопровождающих её работу, эффектов[2].

Настоящий прибор, реле приближения, сделан на основе открытия нового физического явления: передача энергии индуктивностей через магнитные моменты вещества, находящегося в окружающем пространстве.

Электронный датчик - реле делает изолированный отрезок проводящего материала произвольной формы и размера чувствительным к приближению извне.

Новизна в том, что в отрезок изолированного металлизированного материала с помощью транзисторной схемы, сопряженной с трансформатором Тесла, создается объемный электрический заряд. Вторжение в зону заряда извне вызывает срабатывание герконового реле РЭС 55. Из-за климатических изменений ложных срабатываний не происходит, но изменяется дистанция чувствительной зоны при условии надежной изоляции материала.

Реле работает от источника питания постоянного тока напряжением от 12 до 30 вольт. Ток потребления в режиме ожидания до 5 мА, в режиме извещения до 10 мА. Радиус зоны чувствительности зависит от настройки и может быть от 1 м до 0 (касание). Информацию о приближении можно получить по изменению состояния комбинированного контакта: замкнутый контакт размыкается, разомкнутый замыкается. Этими контактами можно запустить любую информационную цепь. Выходное реле коммутирует постоянный или переменный ток до 0,25 А при напряжении до 220 В на миллион срабатываний. Прибор гарантирует срабатывание на касание к сенсору, состоящему из тонкого металлического изолированного провода длиной 5 метров. Оптимальная поверхность 50x50 см[3].

Области применения.

1. Извещатель, используемый в системах охранной сигнализации для проводного и беспроводного оповещения, включение видеонаблюдения на любых объектах, включая двери, окна, полы, балконы, сейфы, периметры, прилавки и сигнализатор тревоги. Преимущество данного реле в том, что оно позволяет применять нестандартные схемы его установки, что

ставит дополнительный барьер для взлома охранной системы. Сигнализатор протечек, показатель уровня воды и сыпучих материалов, управление клапанами пуска воды в душе и умывальнике. Обеспечение техники безопасности на производстве, связанном с возможностью травматизма. В авто- и гаражной охранной сигнализациях.

2. Преобразование неэлектрических величин, таких как расстояние, угол, давление, температура, вес, сила, ускорение, уровень, расход в электрические, напряжение, сила тока, частота. Образцы измерителей такого рода уже разработаны, они дешевле существующих на несколько порядков и при наличии спроса могут быть произведены и сертифицированы в короткие сроки.

3. Поскольку качер (трансформатор Тесла на транзисторе) может управлять транзисторами малой и большой мощности, причем на значительной дистанции, то это годится для робототехники и средств автоматизации. Для связи предыдущего с последующим каскадом не требуется гальванической связи, достаточно трансформаторной связи с малым количеством витков (единицы). Это упрощает всякую схемотехнику.

4. Качеры имеют в медицине очень широкое применение - от стимуляторов нервных окончаний до измерителей давления и скорости движения крови.

5. Еще одним из вариантов применения "реле приближения" является установка чувствительной зоны на задний бампер автомашины на изолированной (не проводящей ток) подложке или пластике. Чувствительная зона реагирует на любое препятствие в радиусе 1 метр, это важно в тех случаях, когда препятствия не видно водителю (торчащий из земли кусок арматуры, собака, кошка, ребенок и т.п.).

Оптовая цена - 150 руб. за единицу.

Также, на основе конструкции датчика и трансформатора Тесла можно построить систему, благодаря которой будет возможна передача переменного тока по одному проводу.

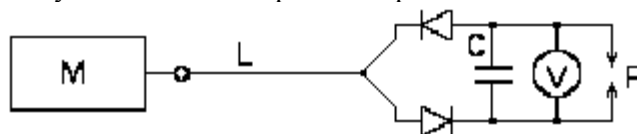


Рис.2. Схема однопроводной передачи энергии.

Основу устройства для однопроводной передачи энергии составляют качер (M) и два последовательно включенных полупроводниковых диода (рис.2). Если их присоединить к проводу, находящемуся под переменным напряжением, то через некоторое время в разряднике P наблюдается серия искр. Временной интервал от подключения до появления разряда зависит от величины емкости C, величины напряжения, частоты пульсации и размера зазора P. Включение в линию передачи L резистора номиналом 0-10 Мом не вызывает существенных изменений в работе схемы[4].

На рис. 3 представлена схема "вилки Авраменко" ("ВА"), где  $R_1 = 2-5 \text{ МОм}$ ,  $R_2 = 2-100 \text{ МОм}$ . Ток в цепи измеряется магнитоэлектрическим амперметром, напряжение - электростатическим вольтметром. Выявляется, что результаты подсчета, по привычным формулам, мощности  $W_2 = I_2 * U_2$  и  $W_2' = I_2^2 * R_2$ , не совпадают, формулы не обманывают, остается усомниться в правильности измерений  $I_2$ ,  $U_2$ ,  $R_2$ . Но если  $W_2$  определять по мощности тепловыделения на резисторе  $R_2$  или на разряднике P, то она окажется намного больше расчетных  $W_2$  и  $W_2'$ .

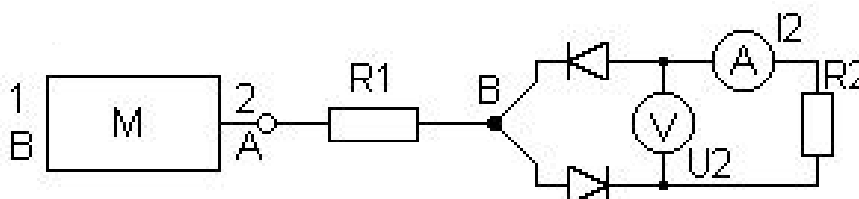


Рис.3. Измененная схема однопроводной передачи энергии.

Удивительно, тогда предстоит найти и объяснение, почему при  $R_1 = 0$ ,  $W_1 < W_2$ , при обоих способах расчета, если измерять ток  $I$ , в линии  $L$ . Замечено, что при  $R_1 = 5-10$  МОм никаких изменений в работе "ВА" по сравнению со случаем, когда  $R_1 = 0$ , не происходит.

Известно, что газоразрядные лампы светятся в сильном электрическом поле, в поле от "вилки Авраменко" они загораются без пусковых устройств и светят максимально ярко. Практическую значимость этого трудно переоценить, т.к. цена пускового устройства современной лампы дневного света (люминесцентной) составляет не менее 80% от всей ее стоимости[5]. Но самое удивительное - сгоревшие лампы светятся, как новые. Ток в вилке течет и без подключения емкости. Кроме того, когда по линии передавалась мощность в 1,3кВт, вольфрамовая проволока, диаметром 20 микрон, должна была разорваться, ни чего подобного не произошло. Так же, нет объяснения, почему резистор в десятки МОм существенно не изменяет ток в вилке? Получается, что ток в линии свободно проходит через резистор. Выходит, что линия  $L$  не имеет привычного сопротивления и магнитного поля, а резисторы в "ВА" теряют свои номиналы, поскольку  $I_2^2 * U_2$ , и  $I_2^2 * R_2$  не соответствуют тепловой мощности в "ВА".

Возможно, опыты Николы Теслы по передаче энергии были чем-то похожи на описанные выше эксперименты. По крайней мере, эксперименты показывают, что революционные идеи Н.Тесла по беспроводной передаче энергии имеют реальные перспективы использования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Аппарат для производства электрических токов высокой частоты и потенциала: пат. 568176 USA; заявл. 22.09.1986; опубл. 08.06.1987.
2. Лаптев А.С. Беспроводная передача электроэнергии// ООО "РегионЭлектроСтрой". 2010. URL.: <http://www.res.okis.ru/interest.html> (дата обращения: 25.03.2012).
3. Ловчев А. К. Качер// Радио Кот. 2011. URL.: <http://radiokot.ru/lab/analog/20/> (дата обращения: 8.04.2012).
4. Гарбарук В.И. Однопроводная и беспроводная передача энергии//SKIF. 2011. URL.: <http://www.skif.biz/index.php?name=Pages&op=page&pid=118> (дата обращения: 15.04.2012).
5. Косинов Н.В. Энергия вакуума // Энергия будущего века – 1998. – № 1. – С. 28-31.

#### Сведения об авторах:

**Григорьев М.Г.:** студент Института неразрушающего контроля ТПУ.

e-mail: Mishatpu@sibmail.com.

Область научных интересов: Однопроводная и беспроводная передача энергии, «вечный двигатель».

**Вавилова Г.В.:** старший преподаватель каф. ИИТ Института неразрушающего контроля ТПУ.

e-mail: wgq@tpu.ru

УДК

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УЧЕТА РАСХОДА ВОДЫ ДЛЯ ЖКХ (AUTOMATED SYSTEM OF WATER DISCHARGE FOR HOUSING)

Е.В. Кадалова, А.Б. Степанов  
E.V. Kadalova, A.B. Stepanov

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30  
E-mail: ekadalova@mail.ru

В данной работе речь идет об автоматизированных системах учета расхода энергоресурсов, а в частности воды в жилых домах. Также о вариантах реализации этих систем и об их уровнях построения. Рассматриваются способы передачи данных по каналам и частотные диапазоны работы.  
(In this paper, told about automated metering systems, energy resources, particularly water in homes. Also on options for the realization of these systems and their levels of building. Review means of data transmission through the channels and frequency bands work.)

### **Ключевые слова:**

Расход, канал передачи данных, расходомер, автоматизированная система.  
(Flow, data transmission channel, flow of meter, automated of system.)

Россия является одним из наиболее обеспеченных водными ресурсами государств. Однако в результате антропогенного загрязнения качество воды для большей части источников довольно низкое. Данная ситуация в основном сложилась из-за бесконтрольного использования воды. Исследования, проводимые в течение последних нескольких лет, показывают, что в России потенциал энергосбережения в жилом секторе достигает 40-50%. На фоне постоянного уменьшения дотаций государства в сферу жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) и рост цен, все большее значение приобретает проблема сбережения и учета ресурсов. Основные ресурсы контроля – вода, газ, тепло и электроэнергия. Современные системы, автоматически контролирующие все эти ресурсы, охватывают три уровня, такие как уровень сбора информации, уровень передачи информации и уровень накопления, анализа и хранения информации [1]. При этом с точки зрения разработчика подобных систем наиболее интересны первые два уровня. На этих уровнях происходит размещение датчиков, организация передачи данных и совместная их работа. При этом практикуется как поквартирный учёт, так и подомовой учёт ресурсов.

Все подобные системы представляют собой аппаратно-программные комплексы, в состав которых входят приборы учета, контроля, управляющие устройства и программное обеспечение, которое помогает оператору (диспетчеру) ориентироваться в поступающей информации, осуществлять контроль и управление. У этого способа есть ряд достоинств, такие как циклический опрос счетчиков; выдача данных и обмен информацией между потребителем и диспетчером; учет времени работы прибора в часах (дата и время); оперативное отключение/подключение потребителя или ограничение водопотребления диспетчером и защита от несанкционированного водопотребления.

Системы диспетчеризации бывают двух видов: локальные и удаленные. Важно заметить, что локальная диспетчеризация, когда диспетчер находится в непосредственной близости от объекта, уже не удовлетворяет современным требованиям. Поэтому для передачи данных о расходе воды применяется удаленная диспетчеризация, так как она может осуществлять передачу параметров от одной или нескольких автоматизированных систем с территориально удаленных объектов на центральную станцию диспетчеризации, с помощью различных каналов передачи данных. Таким образом, персональные компьютеры автоматизированных рабочих мест диспетчеров объединяются в локальную сеть следующего уровня, которая в свою очередь может быть физически организована на базе телефонных каналов, оптоволоконного кабеля, радио или сотовой связи по протоколам Internet, Intranet и т.д.

Передачу данных можно осуществлять с помощью кабеля или беспроводным способом. В настоящее время все чаще применяются беспроводные сети передачи данных, так как такие сети не требуют времени и средств на прокладку кабеля.

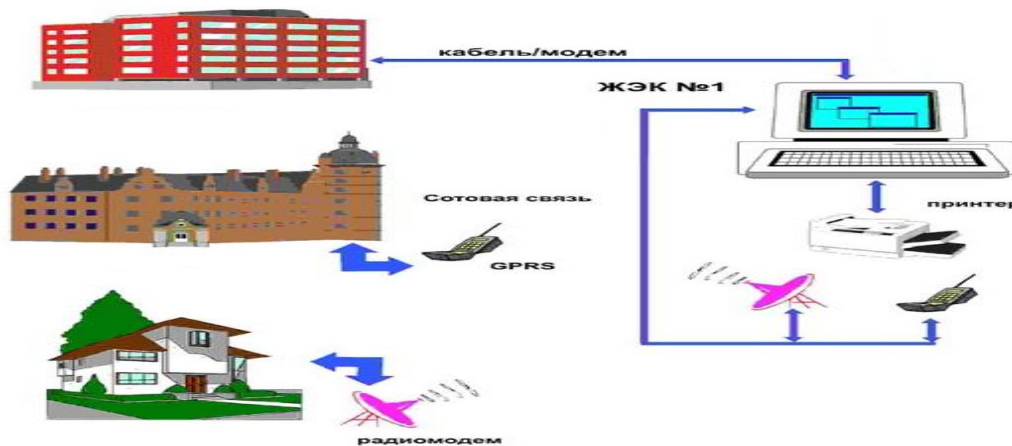


Рис. 1. Организация обмена данными между домами и диспетчером.

На рис. 1 показаны различные варианты объединения домов в локальную сеть диспетчеризации. При этом информация, полученная каждым ЖЭКом, отправляется на следующий уровень – диспетчеру района. Заметим, что общедомовые контроллеры могут передавать информацию по кабелю, по телефонным проводам (модему), по сотовому каналу (GPRS, SMS сообщения), по радиоканалу через радиомодем.

Распространенными видами осуществления передачи данных к диспетчеру являются:

- 1) Объект, узел сбора информации, GPRS модем, Internet, устройство подключения к сети Internet, диспетчер;
- 2) Объект, узел сбора информации, радио модем, радиоканал, радио модем, диспетчер;
- 3) Объект, узел сбора информации, GSM модем, sms – сообщения, сеть GSM, sms – сообщения, GSM модем, диспетчер;
- 4) Объект, контроллер, GSM модем, sms – сообщения, сеть GSM, sms – сообщения, GSM модем, диспетчер;  
Объект, контроллер, модем, телефонная станция, модем, диспетчер;
- 5) Объект, узел сбора информации, модем, телефонная станция, модем, диспетчер;
- 6) Объект, узел сбора информации, интерфейс обмена информацией RS – 485, адаптер связи, диспетчер [2].

Каждый из указанных выше способов передачи данных информации имеет свои достоинства и недостатки, и может быть применен в конкретных случаях в зависимости от удаленности объекта диспетчеризации и экономических показателей при монтаже и последующей эксплуатации подобных систем учета [3].

Выбранная сеть должна удовлетворять некоторым требованиям: высокая пропускная способность, возможность охвата небольших расстояний, связность подключенных станций и возможность широковещания. Кроме того, существует набор требований, характерных только для локальных беспроводных сетей. Приведем важнейшие из них: производительность, число узлов, соединение с локальной магистральной сетью, обслуживаемая область, устойчивость передачи и безопасность, совместная работа в сети, переключение/роуминг, динамическая конфигурация [4].

Рассмотрим достоинства и недостатки различных вариантов построения сети.

Преимущества кабельной сети: защищенность от атмосферных помех и излучений солнца; высокая степень безопасности данных. Недостатки: прямая передача сигнала сильно влияет на обратную передачу, поскольку вся информация передается по одному каналу.

Преимущества GSM/GPRS: широкое распространение; широкий набор методов и тарифных планов. Недостатки GSM/GPRS: не везде достаточный уровень сигнала для уверенного приема; сложности при решении технических вопросов в "глубинке" с операторами GSM.

Преимущества радиоканала: относительная дешевизна радиомодемов с не лицензируемыми диапазонами частот; гибкость при построении радиоканала. Недостатки радиоканала: сложности при решении технических вопросов в "глубинке"; в общедоступных каналах могут возникнуть коллизии с другими радиосистемами.

В таблице 1 представлены основные характеристики различных каналов связи. Анализ этих характеристик позволяет сделать вывод о том, что самым дешёвым способом передачи является кабельная связь, а самым дорогим – сотовая связь (по эксплуатационным затратам). Несмотря на это беспроводная связь обладает преимуществами перед кабельной связью, такими как: высокая скорость доступа в интернет; возможность подключаться к сети другого типа; мобильность; легкость создания и реструктуризация. Кроме того, локальные беспроводные сети экономят средства на прокладку кабеля локальных сетей, облегчают задачу передислокации и другие модификации структуры сети.

Таблица 1. Сравнительная характеристика каналов связи

| <b>Канал связи</b>    | <b>Дальность</b>                     | <b>Надежность</b> | <b>Стоимость</b> |
|-----------------------|--------------------------------------|-------------------|------------------|
| <b>Кабельная сеть</b> | Не ограничена                        | Низкая            | Низкая           |
| <b>GPRS/GSM</b>       | Ограничена зоной сотовой связи       | Средняя           | Средняя/Высокая  |
| <b>Радиоканал</b>     | До 10 км в условиях прямой видимости | Высокая           | Высокая          |

Важно отметить, что наиболее рациональным способом передачи связи между контроллером в квартире и общедомовым контроллером является радиоканал, т.к. в этом случае отсутствуют требования прямой видимости между устройствами. А передачу данных в диспетчерский пункт также лучше установить через беспроводную связь: используя радиоканал либо GSM модем, так как в этом случае передача данных может осуществляться на большие расстояния и без дополнительных затрат на материалы.

На сегодняшний день разработчик имеет множество альтернативных систем для беспроводной передачи данных, во всем мире предоставляются так называемые нелицензируемые (ISM - Industrial, Scientific, Medical) радиочастотные диапазоны. Например, радиомодем с собственным протоколом в диапазонах 27 МГц, 142-172 МГц, 433 МГц, 868 МГц, 915 МГц и 2400 МГц; системы передачи данных на основе стандартов ZigBee/802.15.4, Bluetooth, Wi-Fi и даже Wi-Max.

Современная промышленность выпускает широкий круг радиопередающих приборов, действующих на расстоянии от одного до нескольких сотен метров и даже десятков километров, отличающихся скоростью передачи данных, мощностью передатчика, рабочим диапазоном частот, конструктивным исполнением. Появление приемопередающих устройств, выполненных в виде одной интегральной или гибридной микросхемы, не требующих настройки, и предполагающих подключение минимального количества внешних элементов, позволяет максимально упростить конструирование радиомодемов. Радиочастотные модули весьма просты в применении – для включения достаточно подать питание и подключить антенну [5]. Преимуществом так же является большое число производителей радиочастотных модулей. Подобные устройства выпускаются фирмами Infineon Technologies AG, Gran-Jansen AS, Xemics, RF Monolithics Inc., Microchip, Maxim, Telecontrolli и др.

Пропускная способность канала, дальность связи, стоимость элементной базы и вопросы лицензирования – все эти параметры зависят от используемой частоты.

Радиочастотный диапазон для России 433,075-434 МГц, 868,7869 МГц, 2,4 ГГц. Эти частоты могут использоваться без оформления соответствующего разрешения Государственной комиссии по радиочастотам при условии соблюдения требований по ширине полосы излучаемой мощности: до 10 мВт для диапазона 433 МГц, до 25 мВт для диапазона 868 МГц и до 100 мВт для диапазона 2,4 ГГц.

Большинство беспроводных систем функционируют в нелицензируемом диапазоне ультравысоких частот 2,4 ГГц. Из-за насыщенного трафика возрос интерес к диапазонам ISM,

расположенным на более низких частотах — 433 и 868 МГц. В отличие от диапазона 2,4 ГГц, единого глобального стандарта, регламентирующего работу устройств в более низких ISM ультравысоких частотных диапазонах, нет.

В полосе частот 2400-2483,5 МГц используется новая технология - ZigBee построения беспроводных сетей передачи данных, в семействе IEEE 802.15 Low Rate Wireless Personal Area Network (LR-WPAN - беспроводные персональные вычислительные сети). Сети, выполненные по технологии ZigBee, являются самоорганизующимися и самовосстанавливающимися сетями, что значительно облегчает установку системы, т.к. узлы способны самостоятельно определять и корректировать маршруты доставки данных.

Поскольку требования к пропускной способности для таких систем учёта не велики, а вопрос цены и требование безлицензионного применения являются существенным, то разумным будет использовать диапазон 433 МГц или 868 МГц.

Так как использование частоты 433 МГц очень велико, то она является «засоренной», и поэтому необходимо использовать диапазон 868 МГц, тем более что в России с 2008 года для устройств, работающих в этом диапазоне, разрешена мощность в 2,5 раза больше, чем для диапазона 433 МГц. Переход на диапазон 868 МГц приводит к тому, что антенны становятся менее громоздкие, а также с увеличением радиочастоты уменьшается уровень фоновых и промышленных помех.

Так, например, система «Siemesa» (концерн Siemens) позволяет получать показания счетчиков за потребление коммунальных услуг с использованием диапазона 868 МГц. Сбор данных может осуществляться либо локально, либо из любой точки (в этом случае данные передаются по каналам GSM, GPRS, компьютерным сетям или широкополосным кабельным сетям). Российскими аналогами данной системы являются такие системы, как: «Солярис», «Пульсар» и «Альфа-ISM».

В современных автоматизированных системах получили широкое применение четыре метода измерения расхода воды: тахометрический (принцип работы тахометрических счетчиков воды основан на помещении в поток рабочей среды крыльчатки или турбинки, которая связана со счетным механизмом); электромагнитный (счетчики этого типа в основном используются в промышленности, работают при помощи взаимодействия магнитного поля с движущейся жидкостью; магнитное поле индуцируется со скоростью, пропорциональной скорости движения жидкости); ультразвуковые (при прохождении через поток ультразвуковых колебаний, происходит измерение расхода жидкости, при помощи анализа акустического эффекта); вихревой (принцип работы основывается на помещении некоего тела особой формы в поток жидкости, при этом частота вихрей, возникающих на теле, будет пропорциональна скорости потока). В России наиболее часто применяют тахометрические и электромагнитные водосчетчики. Каждый тип расходомеров имеет свою сферу применения, а выбор прибора для каждого конкретного случая – это поиск оптимального сочетания цены, стоимости монтажа, стоимости обслуживания и т.п. Оптимальным вариантом являются тахометрические расходомеры, которые удовлетворяют эксплуатационным и ценовым качествам. В свете реформы ЖКХ большое внимание уделяется тахометрическим водосчетчикам с импульсным выходом. В таких приборах показания счетного механизма преобразуются в электрический сигнал и в импульсном (цифровом) виде могут передаваться и выводиться на конечное регистрирующее устройство, удаленное от места непосредственного учета расхода воды потребителем. Это создает предпосылки для создания единых компьютеризированных систем автоматического контроля, и, вероятно, именно такие водосчетчики станут в будущем самыми распространенными счетчиками для квартирного учета воды [6].

Автоматизированных систем сбора данных могут быть двухуровневыми и многоуровневыми. Первый тип предполагает непосредственную передачу данных с **первичных измерительных приборов** (ПИП) на информационно-вычислительный комплекс (ИВК) (рис. 2). Данная архитектура применима для относительно небольших систем, в которых количество ПИП измеряется десятками (в крайнем случае, сотнями) единиц. Единственным достоинством двухуровневых систем является снижение стоимости точки учета, вследствие отсутствия уровня **информационно-вычислительного комплекса энергоустановки** (ИВКЭ).



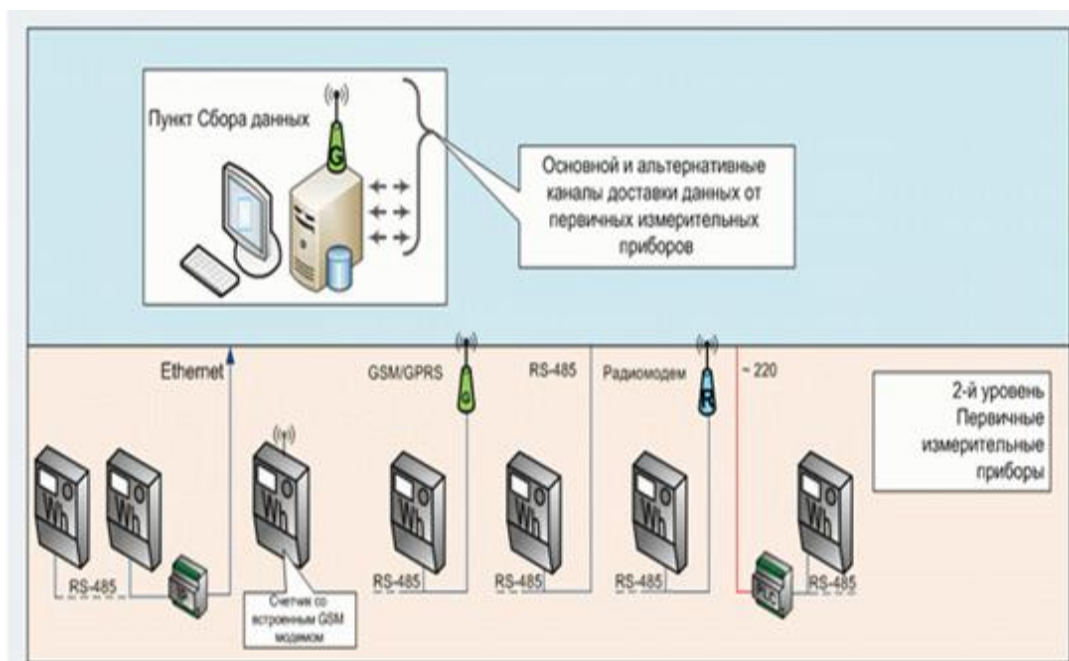


Рис. 2. Пример двухуровневой системы учета.

Многоуровневые системы предполагают существование дополнительного уровня **ИВКЭ** со специализированными контроллерами – устройствами сбора передачи данных (УСПД) (рис. 3 и рис.4). При этом сами **ИВК** могут иметь многоуровневую иерархическую структуру. Перечислим основные преимущества многоуровневых систем:

- Хранение информации о потреблении хранится в структурированном виде, позволяющем на каждом уровне иметь соответствующие аналитические разрезы. Например, информация о суточном потреблении каждого жильца многоквартирного дома будет излишней на уровне энергоотпускающей компании, но будет полезна на уровне управляющей компании, выявляющей несанкционированное подключение.

- Дублирование информации на нескольких уровнях (счетчик, УСПД, ИВК и т.д.). Что, несомненно, позволяет повысить надежность хранения данных.

- Применяемые на среднем уровне УСПД, дополнительно несут нагрузку маршрутизаторов. Это дает возможность построения надежной и гибкой среды доставки информации за счет обеспечения альтернативных и оптимизирующих маршрутов.

Отличие многоуровневой системы в том, что в варианте 2 (рис. 4) используется 4 уровня, (первичные измерительные приборы, контроллеры и диспетчер, а в варианте 1 (рис. 3) отсутствуют промежуточные операции, т.е. данные поступают от измерительных приборов сразу в диспетчерский пункт на хранение и обработку информации.

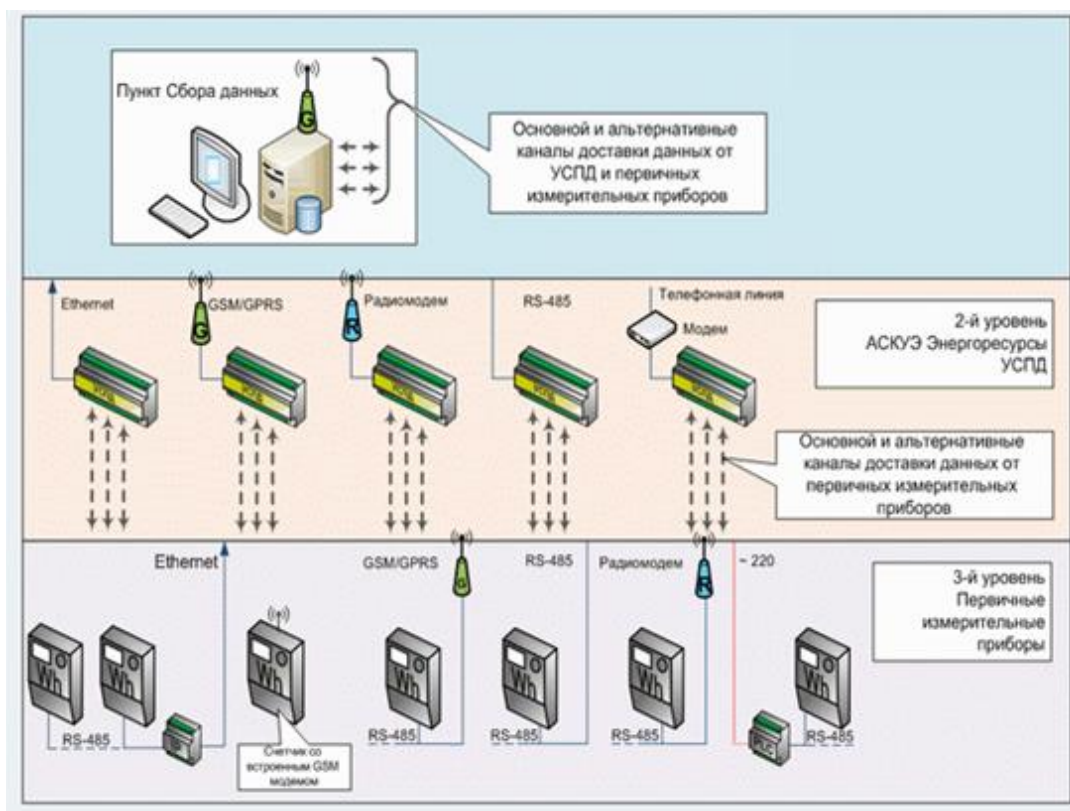


Рис. 3. Пример многоуровневой системы учета (Вариант 1).

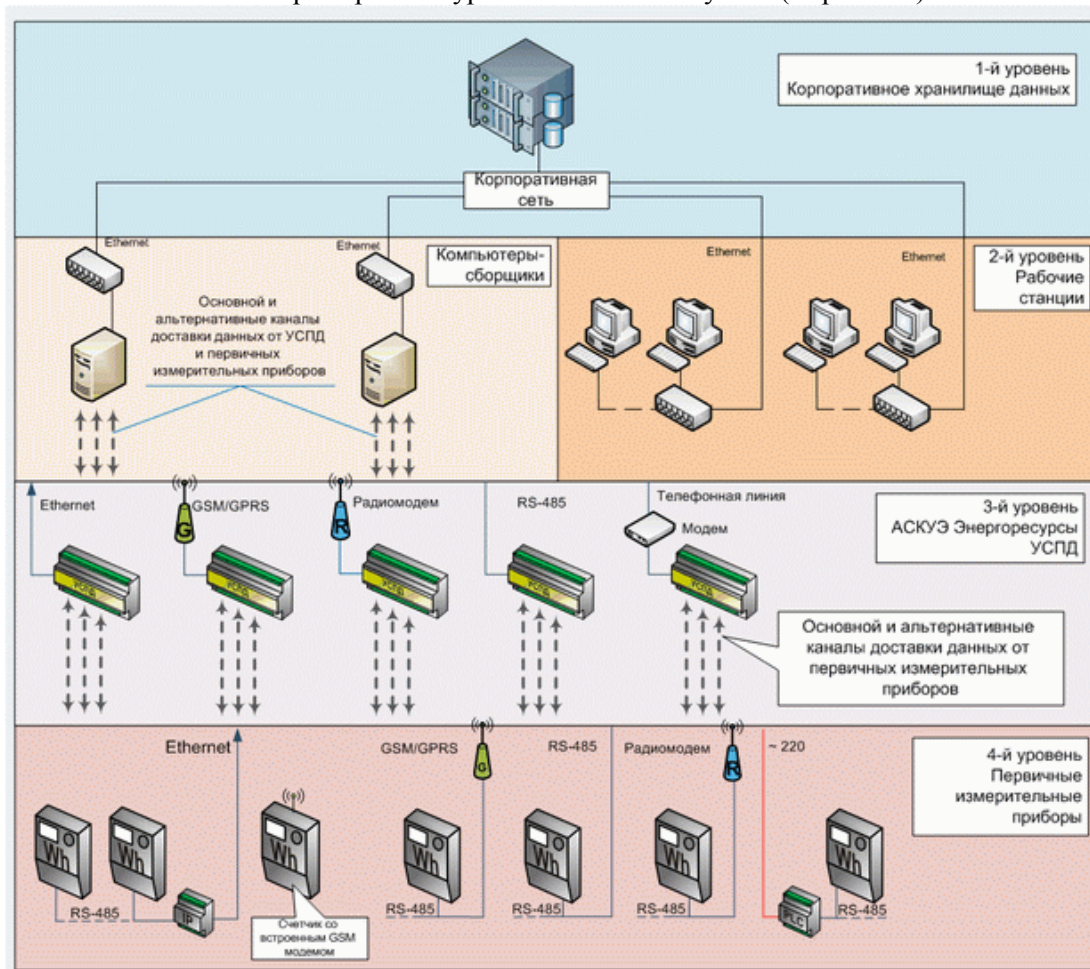


Рис. 4. Пример многоуровневой системы учета (Вариант 2).

В результате рассмотрели виды автоматизированных систем сбора информации в жилом доме. Определили, что правильнее использовать многоуровневые системы (вариант 1 либо вариант 2) с использованием беспроводного типа передачи данных через радиоканал на частоте 868 МГц.

Выявили важные функции автоматизированных систем поквартирного учета потребления водоснабжения:

- Измерение расхода воды;
- Формирование электрических импульсов пропорционально расходу;
- Суммирование импульсов от подключенных расходомеров;
- Хранение данных по каждому из них;
- Опрос в автоматическом режиме всех подключенных контроллеров этажных;
- Хранение данных;
- Передача на верхний уровень.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Калачев А. **ОБОРВИ СЧЕТЧИКУ ПРОВОДА: БЕСПРОВОДНЫЕ РЕШЕНИЯ ДИАПАЗОНА <1 ГГц ОТ TEXAS INSTRUMENTS//Аналоговые микросхемы №7. 2012. URL: <http://www.compeljournal.ru/enews/2011/7/5>**

2) (1)Системы диспетчеризации//Производственная компания Котэл. 2010. URL: <http://www.kontel.ru/disp.htm>

3) (2) Диспетчеризация инженерных систем и жилого фонда ЖКХ//НАНКО-ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИЯ. URL: <http://www.nanko.ru/disp/reshzhkh.htm>

4) (3)Столлингс В., Беспроводные линии связи и сети.: Пер. с англ. - М., Издательский дом «Вильямс», 2003.- 640 с.

5) Пушкарёв О. Беспроводная передача данных в безлицензионном диапазоне 433 МГц // Беспроводные технологии. URL: [http://gsm.contrel.ru/info/articles/article\\_2/](http://gsm.contrel.ru/info/articles/article_2/)

6) Водосчетчики// ООО НПО Роспромкомлект. 2011. URL: <http://nporpk.ru/Katalog.aspx?cid=67>

#### **Сведения об авторах:**

**Кадалова Е.В.:** г.Томск, магистр ТПУ, гр. 1М401.

**Степанов А.Б.:** старший преподаватель кафедры Информационно-измерительной техники Томского политехнического университета.

УДК 681.586.32

## ЛАЗЕРНЫЙ ДОПЛЕРОВСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ СКОРОСТИ И ДЛИНЫ (LASER DOPPLER MEASURING INSTRUMENT OF VELOCITY AND LENGTH)

А.В. Хурхесова, Е.М. Федоров  
A.V. Khurkhesova, E.M. Fedorov

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
E-mail: anuytka\_@sibmail.com

Рассмотрены принципы построения лазерный доплеровских измерителей скорости и длины.  
(Construction concept has been presented.)

### Ключевые слова:

Кабельная продукция, измерение скорости и длины, лазер.  
(Cable production, measurement of velocity and length, laser.)

### Введение

Одним из важных критериев при повышении эффективности технологических процессов производства и учета кабельной продукции является точное измерение скорости движения и длины кабеля и проволоки в режиме реального времени.

Использование лазерной технологии исключает массу проблем, связанных с применением традиционных контактных механических устройств на базе измерительных роликов и гусеничных ремней, таких как погрешности от проскальзывания, износа колеса, вибрации. Лазерные приборы отличаются быстродействием, высокой надежностью и точностью, рассчитаны на широкую номенклатуру контролируемых объектов с различными поверхностями, практически не требуют профилактического обслуживания.

### Теоретические основы

В основу лазерной доплеровской анемометрии положен эффект Доплера – изменение частоты регистрируемых колебаний при движении источника или приемника волн. При движении источника монохроматического излучения относительно неподвижного приемника со скоростью  $V$  приемник регистрирует изменение частоты.

На практике используется двукратный эффект Доплера, при котором объект исследования движется, а передатчик и приемник сигнала неподвижны.

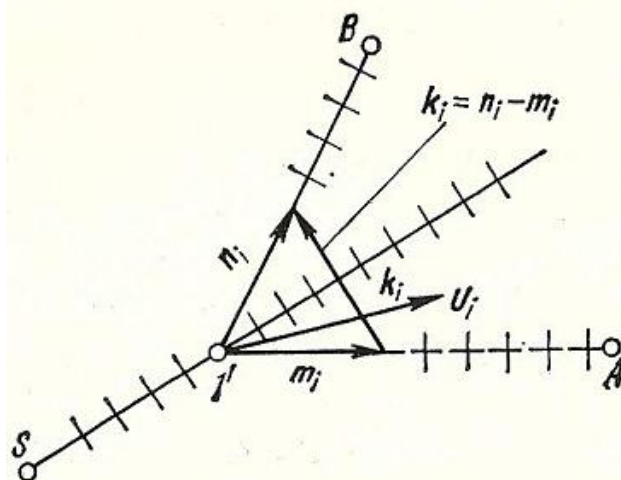


Рис. 1. Векторная диаграмма эффекта Доплера

Движущийся объект  $I'$  (рис) можно рассматривать как приемник волн от неподвижного источника  $S$  и одновременно как передатчик — ретранслятор их неподвижному наблюдателю, расположенному в точках  $A, B$ . Из-за медленного отклика фотоприемников непосредственное измерение частоты в этих точках не используется. Поэтому на практике используется наложение двух волн, рассеянных в различных направлениях. Две рассеянные световые волны будут интерферировать и давать сигнал биений с частотой

$$f = \frac{2V \sin(Q/2)}{\lambda},$$

где  $f$  — выходная частота лазерного датчика;  $V$  — скорость объекта;  $Q$  — угол между лазерными лучами;  $\lambda$  — длина волны лазера.

Так получается сигнал, который может быть зарегистрирован с помощью современных фотоприемников.[1]

Таким образом, измеряя выходную частоту лазерного датчика, можно определить скорость и длину движущегося объекта.

$$V = \frac{f\lambda}{2\sin(Q/2)},$$

$$L = \int_0^t V(t)dt,$$

где  $L$  — длина объекта,  $t$  — время измерения.[4]

#### Лазерный доплеровский измеритель скорости и длины

На рисунке 1 представлена структурная схема лазерного измерителя скорости и длины. Пучок света от полупроводникового лазера непрерывного действия 1 делится расщепителем пучка 2 на два идентичных пучка, которые с помощью зеркала 3 и линзы 4 направляются на исследуемый объект 8. Рассеянный свет собирается на фотоприемник 6 с помощью линзы 5. Преобразованный сигнал попадает в блок обработки доплеровского сигнала 7.

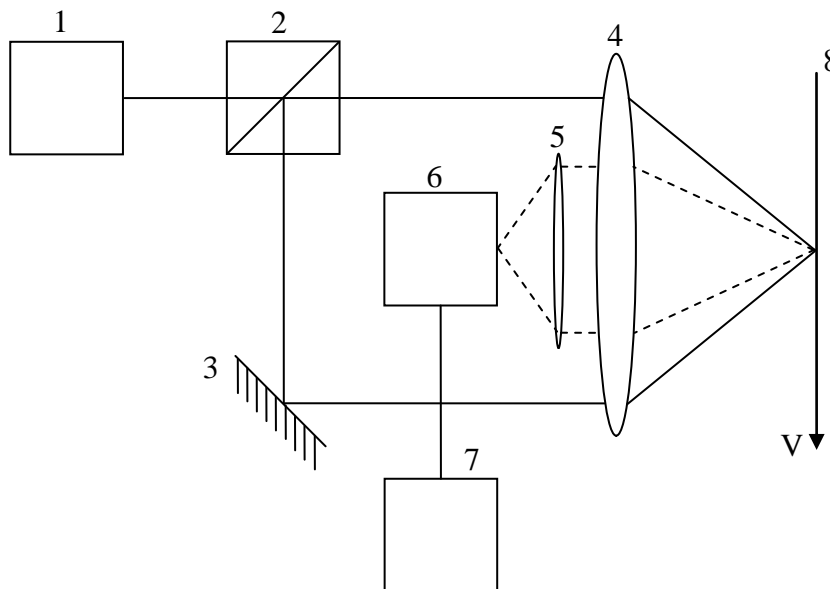


Рис.1. Структурная схема лазерного доплеровского измерителя скорости.

#### Источник когерентного излучения.

В качестве источника когерентного излучения выступает лазер. Практическое применение лазерной доплеровской анемометрии было ограничено, т.к. в качестве излучателей использовались газовые лазеры, что определяло большие габариты и высокую стоимость приборов. Поэтому их применение ограничивалось черной металлургией при учете холодного и горячего проката. Однако переход на полупроводниковые лазеры позволил не только значительно снизить стоимость приборов и уменьшить габариты, но и повысить надежность,

что значительно расширило область применения лазерных доплеровских измерителей скорости. [3]

Выбор лазера в данном случае ограничен видимым диапазоном для проведения юстировки прибора. В качестве относительно безопасного и сравнительного дешевого варианта был использован лазер с длиной волны 650 нм.

*Передающий и приемный тракты*

В лазерной анемометрии используется большое количество различных оптических схем, однако наиболее широкое распространение получили дифференциальные схемы.

Основное преимущество дифференциальных схем – снижение требований к точности настройки оптической системы приемника и независимость доплеровского сдвига частот от положения фотоприемника. В дифференциальной схеме лазерного доплеровского измерителя согласование волновых фронтов рассеянных волн осуществляется автоматически, поэтому фотоприемник работает в режиме прямого фотодетектирования (определяет разность доплеровских частот). В этом случае разность доплеровского сдвига частот не зависит от направления наблюдения, а определяется только углом между падающими пучками и проекцией скорости на биссектрису угла между падающими пучками. [1]

*Объект исследования*

В качестве объекта исследования может выступать любой движущийся элемент.

*Фотоприемник*

Т.к. фоторезистор и фототранзистор обладают большой инерционностью в качестве фотоприемника выбран фотодиод. Далее приведено сравнение различных схем включения фотодиода.

Основные схемы включения фотодиода представлены на рисунке 2 и 3.

Рисунок 2А иллюстрирует схему включения фотодиода в фотогальваническом режиме. Выходное напряжение ( $V_{out}$ ) в этом случае

$$V_{out} = I_p R_L \quad (1)$$

где  $I_p$  — ток фотодиода,  $R_L$  — сопротивление нагрузочного резистора.

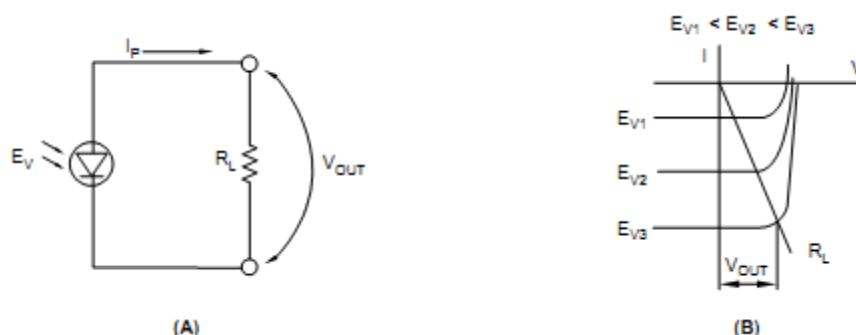


Рис. 2. Схема включения фотодиода в фотогальваническом режиме (А) и ВАХ (Б).

Данная формула справедлива при  $V_{out} < V_{oc}$ , где  $V_{oc}$  — напряжение холостого хода.

Рисунок 3А показывает схему включения фотодиода в фотодиодном режиме с приложенным напряжением  $V_{cc}$ . Выходное напряжение также рассчитывается формуле 1. Рабочая область расширена за счет приложенного напряжения, однако данное напряжение служит причиной увеличения темнового тока ( $I_d$ ), что создает дополнительное напряжение  $I_d R_L$  при отсутствии света.

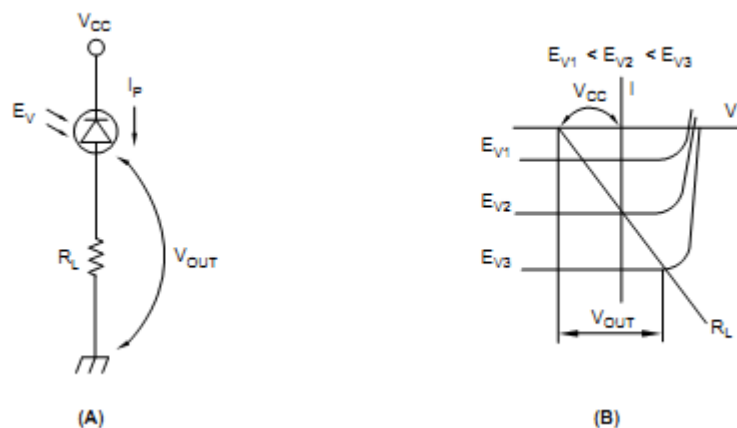


Рис. 3. Схема включения фотодиода в фотодиодном режиме (А) и ВАХ (Б).

#### Схема включения фотодиода в усилительный каскад

На рисунках 4 представлены схемы включения фотодиода в усилительные каскады на основе транзисторов. Для схемы, представленной на рисунке 4А, при освещении фотодиода фототок вызывает понижение выходного напряжения ( $V_{out}$ ) на транзисторе, для схемы 4В — повышение. Резистор  $R_{BE}$  необходим для подавления влияния темнового тока ( $I_d$ ) и выбирается, учитывая следующие условия:

$$\begin{aligned}
 &— R_{BE} < \frac{V_{BD}}{I_d}, \\
 &— R_{BE} > \frac{V_{BE}}{\left(I_p - \frac{V_{CC}}{R_L h_{FE}}\right)}
 \end{aligned}$$

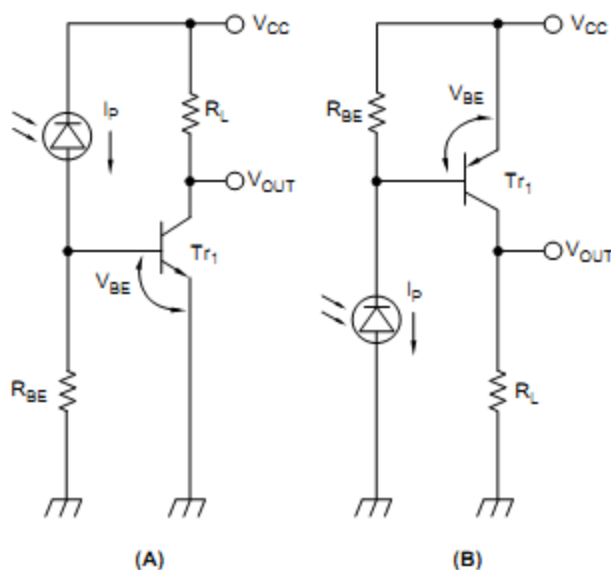


Рис.4. Схема включения с операционным усилителем.

На рисунке 5 представлена схема преобразования фототока в напряжение с использованием операционного усилителя. Выходное напряжение в данном случае

$$V_{out} = I_p R_1 \quad (I_p \cong I_{SC}),$$

где  $I_{SC}$  — выходной ток короткого замыкания. [5]

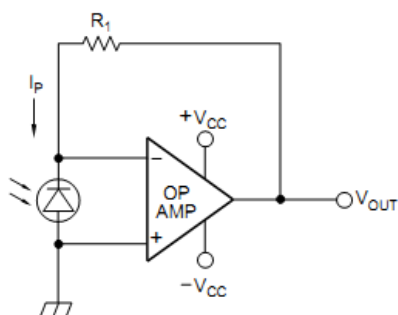


Рис.5

Выбрана схема включения с операционным усилителем для обеспечения необходимого быстродействия и отношения сигнал/шум.

#### *Блок обработки*

Доплеровский сигнал представляет собой стохастический импульсный процесс со случайной модуляцией амплитуды и фазы. После соответствующей обработки может быть получена информация о скорости исследуемого объекта.[2] Поэтому процедура выделения доплеровской частоты довольно сложна.

Все основные методы обработки доплеровского сигнала можно разделить на пять основных групп: спектральный или корреляционный анализ, следящие фильтры-демодуляторы, счетно-импульсные процессоры, корреляторы фотоотсчетов, системы на базе РС.[3]

Наибольшее распространение получили счетно-импульсные процессоры, в которых частота оценивается по пересечениям контрольного нулевого уровня в моменты, когда огибающая сигнала превышает установленный в соответствии с уровнем шума порог. Для гармонического сигнала частота выбросов совпадает с его истинной частотой, а интервал между выбросами одного знака — с истинным периодом. Если сигнал модулирован по амплитуде или представляет собой узкополосный случайный центрированный процесс, то наименьшая дисперсия частоты выбросов получается в случае, когда пороговый уровень выбирается нулевым. Измерение частоты в реальном времени требует формирования последовательностей счетных импульсов, частота которых соответствует частоте несущей в последовательности радиоимпульсов, представляющих доплеровский сигнал, и строб-импульсов, определяющих временные окна для синхронного или асинхронного измерений периода (частоты) счетных импульсов.

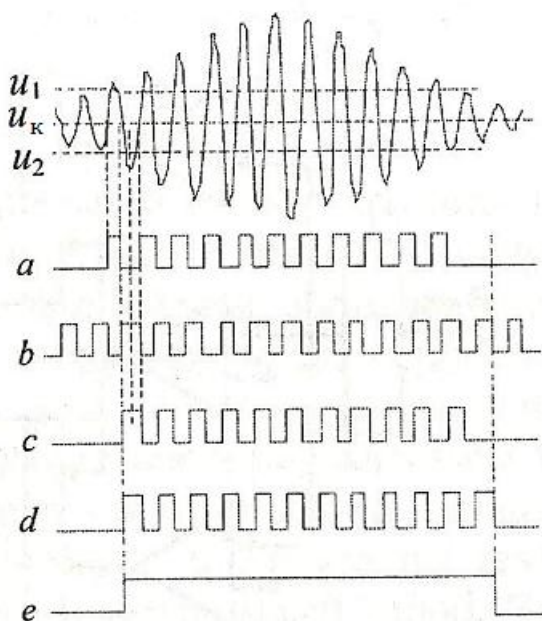


Рис.6



На рисунке 6 приведены диаграммы сигналов, формируемых компараторами по выбросам за контрольный и пороговый уровни в трехпороговой системе, представляющей собой комбинацию двухпороговых систем с общим нулевым уровнем. Показаны сигнал и пороговые уровни, по которым срабатывают компараторы:  $u_1$  - верхний,  $u_2$  - нижний,  $u_k$  - контрольный. Импульсные последовательности на выходах компараторов имеют следующие обозначения:  $a$  - соответствующая срабатыванию компаратора по верхнему уровню  $u_1$ ,  $b$  - по контрольному уровню  $u_k$ ,  $c$  - по нижнему пороговому уровню  $u_2$ . Сигнальный цуг импульсной последовательности  $d$ , формируемый на пересечениях нулевого уровня, начинается с импульса, идущего за пороговым импульсом в последовательности  $a$ , заканчивается импульсом, идущим за последним в импульсной последовательности  $c$ . Строб-импульс  $e$ , определяющий временное окно, открывается передним фронтом первого импульса в сигнальном импульсном цуге и заканчивается задним фронтом последнего импульса в этом цуге. Формирование сигнального импульсного цуга и соответствующего ему временного окна, определяемого строб-импульсом, осуществляется логической схемой. В синхронном режиме сигнальный цуг импульсной последовательности и строб-импульс подаются на счетчик. Строб-импульс задает временное окно, в котором выполняется счет импульсов сигнальной последовательности. Число импульсов за заданный интервал определяет значение доплеровского сдвига частоты, осредненного во временном окне, определяемом строб-импульсом. В асинхронном режиме длительность временных интервалов измеряется с помощью «часов» с заданным разрешением.[2]

#### **Заключение**

В условиях современного рынка к товару предъявляются все новые требования. И очень сложно им соответствовать при использовании устаревшего оборудования и отсталых технологий. Поэтому создание нового оборудования дает шанс облегчить производственный процесс, обеспечивая при этом высокое качество продукции.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Лазерная анемометрия, дистанционная спектроскопия и интерферометрия: справочник / В. П. Клочков, Л. Ф. Козлов, И. В. Потыкевич, М. С. Соскин ; под ред. М. С. Соскина. — Киев: Наук. думка, 1985. — 759 с.
2. Дубнищев Ю.Н. Лазерные доплеровские измерительные технологии — Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2002. — 416 с.
3. Звенигородский Э.Г., Каминский Ю.Д., Проскурнев С.Ю., Рогов П.В., Роднина В.К. Лазерные и оптические измерители скорости и длины//Датчики и системы. — 2003. — № 7. — С. 2–7.
4. Каминский Ю.Д., Проскурнев С.Ю., Заманский В.И. Лазерные доплеровские измерители скорости и длины кабелей и проволоки//Наука и техника. — 2008. — Т.309. — № 2. — С. 27–29.
5. Photodiode/Phototransistor Application Circuit. Sharp application note. — 1999.

#### **Сведения об авторах:**

**Хурхесова А.В.:** г.Томск, НИ ТПУ, магистрант, сфера научных интересов: измерение скорости и длины кабеля.

**Федоров Е.М.:** г.Томск, НИ ТПУ, доцент, кандидат технических наук, сфера научных интересов: измерение скорости и длины кабеля.

УДК 534.321.8

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ ГРОВОВЫХ  
РАЗРЯДОВ  
(ELECTROMAGNETIC ACOUSTIC DETECTION OF LIGHTNING)**

К.В. Вознесенская, А.В. Соловьев  
K. Voznesenskaya, A. Solovyov

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
E-mail: v-ksu@sibmail.com

Приведено описание комбинированной системы грозоопределения, состоящей из инфразвукового комплекса и электрической антенны. Описана методика пеленгации акустических сигналов. Проведена пеленгация акустических сигналов от грозовых разрядов.

(Powered description of the combined system definition of thunderstorms which consists of a complex infrasonic and electric aerial. A technique for direction finding of acoustic signals. Held direction finding of acoustic signals from lightning.)

**Ключевые слова:**

Инфразвуковой комплекс, инфразвук, грозовой разряд, электрическая антенна.  
(Infrasound range, infrasound, lightning, electric antenna.)

Прохождение циклонов, сопровождаемых грозовой активностью, над городской территорией является важным экологическим фактором. Остро встает необходимость заблаговременного предупреждения населения и различных городских служб о прохождении грозовых фронтов, поскольку грозы являются значительным поражающим фактором в местах скопления людей и системе городского жизнеобеспечения. Грозы так же являются причиной техногенных аварий в линиях электропередач (ЛЭП), кабельных линий связи, трубопроводов для транспортирования углеводородного сырья и др. Большинство систем грозоопределения основаны на регистрации электрических и электромагнитных сигналов от грозовых разрядов [1]. Использование подобных методов в городских условиях может сопровождаться различными сбоями, поскольку в городах наблюдается повышенный уровень электромагнитных шумов практически во всем диапазоне частот. Встает вопрос о развитии систем грозоопределения с целью повышения их надежности.

Молниевые разряда являются источником акустической, электрической и сейсмической активности [2,3]. Предлагается использование в качестве информационных параметров электромагнитных и инфразвуковых сигналов от молниевых разрядов.

В Томском государственном университете на кафедре космической физики и экологии ведется непрерывный мониторинг и регистрация низкочастотных акустических шумов. Инфразвуковой комплекс состоит из: трех микробарометров, два из которых находятся на здании лабораторного корпуса СФТИ, а третий расположен вблизи ионосферной станции, и инфразвукового микрофона. Сигнал с датчиков передается на АЦП и затем сохраняется в базу данных на сервер. Инфразвуковой микрофон предназначен для регистрации акустических сигналов в диапазоне частот 0.01-50 Гц. Микробарометры позволяют регистрировать акустические сигналы в диапазоне частот 0.02-4 Гц. Размещение микробарометров представляет собой форму треугольника (рис. 1) [4]. Расстояние между первым и вторым датчиками  $L_{21}=90,851$  м, между вторым и третьим  $L_{23}=276,452$  м.



Рис. 1. Схема расположения на местности низкочастотных акустических датчиков (красными точками под номерами 1,2,3 обозначены микробарометры, синей точкой, под номером 4 обозначен микрофон).

При анализе инфразвуковых сигналов от молниевых разрядов, регистрируемых инфразвукометрическим комплексом, было выявлено 2 типа инфразвуковых сигналов. Первый тип сигнала представляет собой одиночный импульс (рис. 2а). Второй тип сигнала представляет собой серию импульсов или квазигармоническую последовательность (рис. 2б). Наличие разных видов сигналов можно объяснить тем что, длительность и форма инфразвукового сигнала зависит от грозового канала и обратного хода в нем [5].

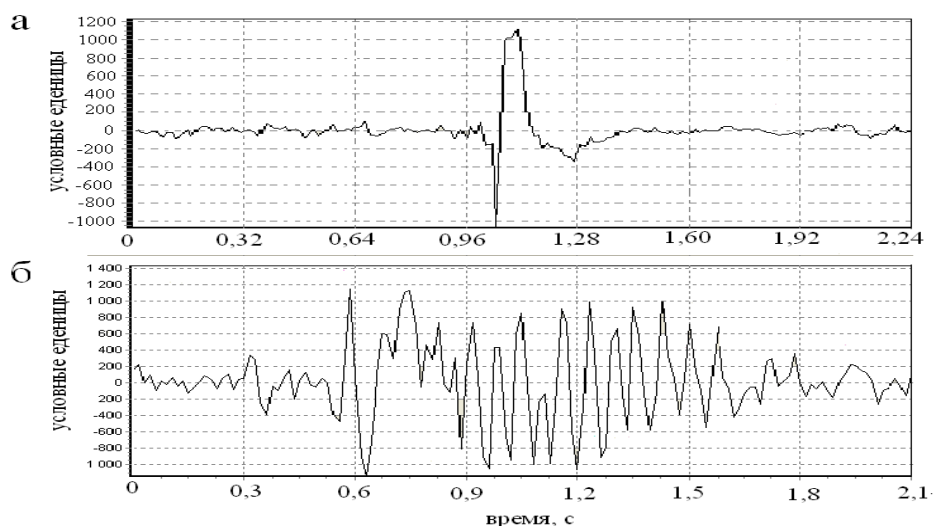


Рис. 2. Два типа инфразвуковых сигналов от молниевых разрядов.

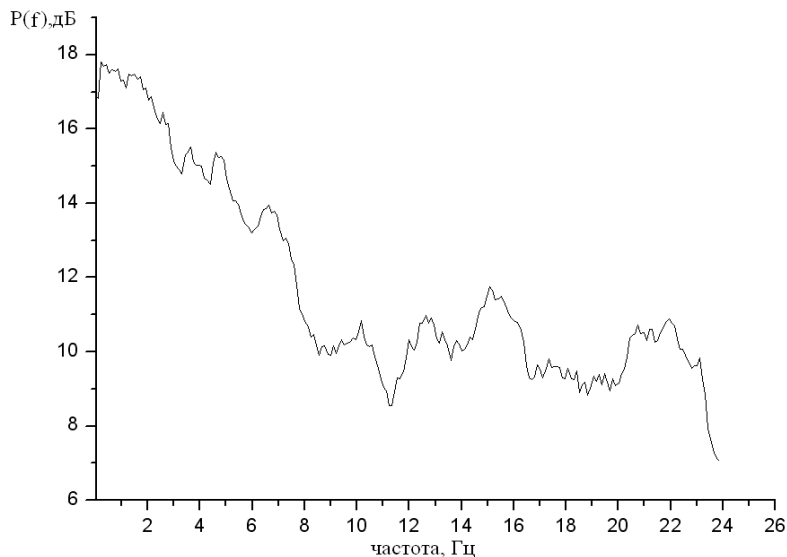


Рис. 3. Спектр относительной интенсивности акустического сигнала от молниевых разрядов,  $P(S)$ -уровень акустических сигналов от молниевых разрядов.

гроз находится на частоте порядка 1 Гц, на фоне общего повышения уровня шумов во время прохождения грозового фронта.

Грозовые электрические разряды в атмосфере сопровождаются мощными акустическими импульсами. Анализ этого явления посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ [например, Юман 1872; Григорьев и др., 1981]. Проводились исследования генерации сейсмических [3] и электромагнитных волн от грозовых разрядов [2]. По литературным данным молнии генерируют в атмосфере акустические волны в широком диапазоне звуковых и инфразвуковых частот. При ударе молнии в спектре наблюдаются два частотных максимума: один в диапазоне частот менее 20 Гц, наиболее часто наблюдается максимум на частотах 0,2 – 2 Гц связанный с разрядом внутри облака, второй в диапазоне между 40 - 60 Гц, связанный с разрядом в землю. Один из механизмов генерации инфразвуковой волны молниевым разрядом был предложен Десслером (1973 год) и потом получил развитие в работах Фью (1985 год). В основу данного механизма заложено то, что электростатическое поле вызывает уменьшение атмосферного давления внутри заряженной области облака, которое повышается до нормального уровня в момент удара молнии. Согласно этой модели колебание атмосферного давления сильно ориентировано в вертикальном направлении и его амплитуда 0,05-5 Па связана с зарядом грозового облака, который нейтрализуется разрядом молнии с максимумом на частотах 0.2-2 Гц. Положение частотного максимума зависит от заряда подстилающей поверхности. [5]. Начальная фаза инфразвуковой волны должна характеризоваться фазой сжатия. Так же характерной особенностью данной волны является уменьшение давления в начале сигнала. Исходя из этих данных, можно отличить инфразвуковые сигналы, источником которых являются грозовые разряды, от сигналов других источников [6].

С помощью инфразвуковой комплекс, состоящий из трех инфразвуковых датчиков, мы можем определить направление прихода акустической волны в плоскости земли (определение пеленга сигнала). Для расчета азимута прихода акустической волны  $\theta$ , и скорости следа волны  $V_p$  пользуемся формулами (1) и (2) соответственно [6]:

$$\theta = \arctg \frac{(x_2 - x_1)\tau_{23} - (x_2 - x_3)\tau_{12}}{(y_2 - y_1)\tau_{23} - (y_2 - y_1)\tau_{12}}$$

$$V_p = \frac{2\pi f}{\Delta\varphi_{12}} [(y_1 - y_2) \cos \theta - (x_1 - x_2) \sin \theta]$$

где  $x_i, y_i$  – координаты микробарометров,  $\tau_{23}, \tau_{12}$  – временная задержка между датчиками.

На рис. 3 представлены спектр относительной интенсивности акустических сигналов от молниевых разрядов, который определяется формулой:

$$P(f) = 20 \lg \frac{S_{mp}(f)}{S_{\phi}(f)}$$

где  $S_{mp}(f)$  – усредненный амплитудный спектр сигнала от молниевых разрядов,  $S_{\phi}(f)$  – усредненный амплитудный фоновый спектр за день. При грозе наблюдается увеличение акустического уровня шумов относительно фонового уровня порядка 18 дБ. Спектральный пик инфразвукового сигнала от

Для примера пеленгации инфразвуковых сигналов от молниевых разрядов проанализировали грозовой фронт 12.07.2011 г. При прохождении грозового фронта наблюдалось 18 молниевых разрядов. Продолжительность прохождения грозового фронта составила приблизительно 68 минут. На рисунке 4 показаны направления прихода инфразвуковых сигналов, где цифрами обозначен номер молниевых ударов.

На рисунке 5 представлено вероятностное распределение направления прихода сигнала. Получено, что доминируют два направления прихода сигналов, а именно восточное и западное. Распределение плотности молниевых разрядов связано с зарядом подстилающей поверхности, по литературным данным максимальная плотность грозовых разрядов приходится на долины рек, что объясняет максимум в восточном направлении [6].

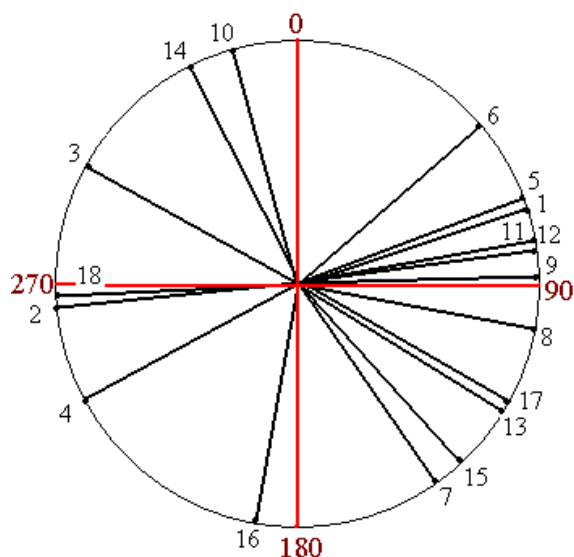


Рис. 4. Пример пеленгации молниевых ударов от грозового фронта 12.07.2011 г.

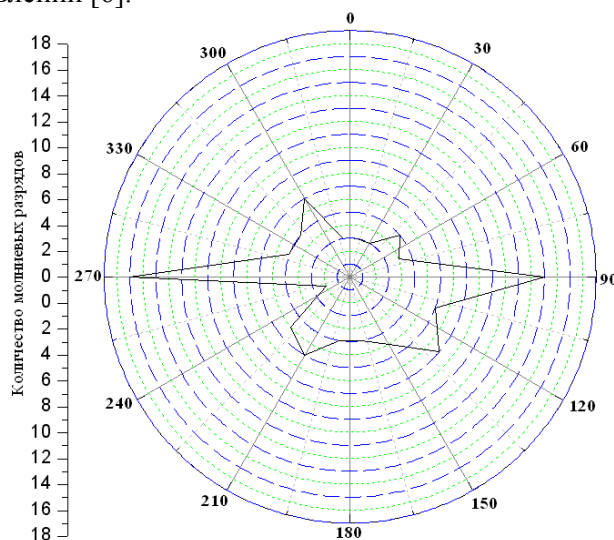


Рис. 5. Распределение направления прихода сигнала от гроз.

Используя комбинированную систему, состоящую из инфразвукового комплекса и электрического флюксметра (ЭФ) (рис. 6) мы можем определить расстояние до источника инфразвука (рис. 7). Электрический флюксметр предназначен для измерения электростатического поля вблизи поверхности Земли. Все датчики системы являются синхронизированными по времени.



Рис. 6. Фотография электрического флюксметра с открытой крышкой.

Расстояние до места инфразвукового события (молниевых разряда) определим по временной задержке ( $\tau$ ) прихода акустической волны относительно прихода электромагнитной волны в приближении, что электромагнитная волна доходит до пункта приема мгновенно

( $c=3 \cdot 10^8$  м/с,  $c_{зв}=3 \cdot 10^2$  м/с). Время задержки определяем по разнице во времени между электромагнитным импульсом и инфразвуковым импульсом (рис. 3). Для определения расстояния от молниевых разрядов до измерительной системы ( $d$ ) и, зная скорость волны и временную задержку, воспользуемся формулой:

$$d = V_p \tau.$$

Таким образом, нам известны такие параметры, как скорость волны, направление прихода акустической волны и расстояние до инфразвукового события. Следовательно, мы можем составить карту пространственного распределения грозных ударов.

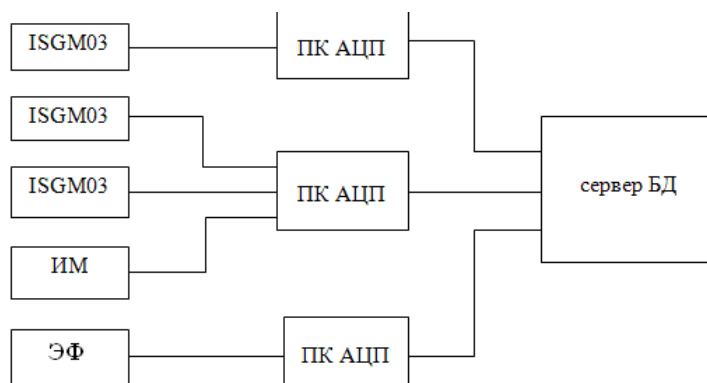


Рис. 7. Структурная схема измерительно-вычислительного комплекса с использованием электрической антенны (ЭА).

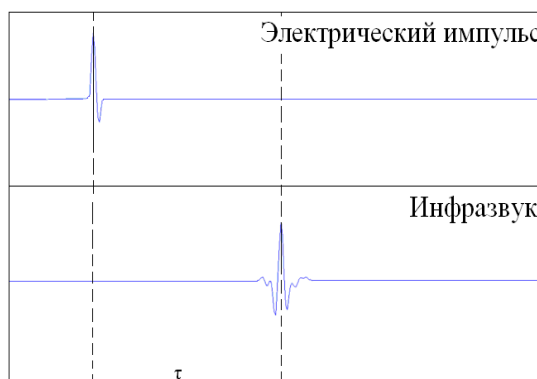


Рис. 8. Временная задержка между акустическим и электрическим сигналами.

В ходе работы было выделено 2 типа инфразвукового сигнала от молниевых разрядов: сигнал представляющий одиночный импульс и сигнал представляющий серию импульсов. Спектральный пик регистрируемых инфразвуковых сигналов от гроз находится на частоте порядка 1 Гц на фоне общего повышения уровня шумов во время прохождения грозных фронтов. Проведена пеленгация акустических сигналов от грозных ударов за грозный период 2011 года. Получено, что доминируют два направления прихода сигналов, а именно восточное и западное. Распределение плотности молниевых разрядов связано с зарядом подстилающей поверхности. Разработана комбинированная система грозообнаружения с использованием инфразвукометрического комплекса и электрического флюксметра. Использование подобной системы грозообнаружения позволит нам составить карту пространственного распределения грозных ударов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Соловьев В.И., Козлов В.И., Мулляр В.А. Дистанционный мониторинг лесных пожаров и гроз в Якутии.// Издательство НЯЦ СО РАН 2009.
- 2) Соловьев С.П., Рыбнов Ю.С. Возмущение электрического поля и генерация акусто-гравитационных волн, обусловленная приближением атмосферного фронта// Геофизика

межгеосферных взаимодействий. Москва ГЕОС 2008. С 95-97.

3) Санина И.А., Ю.С. Рыбнов, А.М. Солдатенко и др., Сейсмоакустические эффекты при грозовой активности// Геофизика межгеосферных взаимодействий. Москва ГЕОС 2008. С 67-79.

4) Провоторов Д.С., Соловьев А.В. Сезонно-суточные закономерности инфразвукового фона //Сборник трудов VI Международной научно-практической конференции «Экологические проблемы. Взгляд в будущее». – Ростов-на-Дону: Росиздат,2010.

5. Lightning: Principles, Instruments and Applications / H.D. Betz et al. (eds.), 2009. – p. 417 – 432.

6) Waldemark K. High Resolution for Infrasound Recording at the Swedish Institute of Space Physics, Swedish Institute of Space Physics , IRF Scientific Report 242, 1997.

**Сведения об авторах:**

**Вознесенская К.В.:** инженер НОЦ «Физика ионосферы и электромагнитная экология» [u-ksu@sibmail.com](mailto:ksu@sibmail.com)

**Соловьев А.В.:** к.т.н. доцент кафедры Космической физики и экологии РФФ ТГУ [andrio@mail.tsu.ru](mailto:andrio@mail.tsu.ru)

УДК 621.391.244

## КОММУТИРУЕМАЯ СШП АНТЕННАЯ РЕШЕТКА ДЛЯ РАДИОВИДЕНИЯ (SWITCHED UWB ANTENNA ARRAY FOR RADIOVISION)

Р.Н. Сатаров, И.Ю. Кузьменко, Т.Р. Муксунов, Е.В. Балзовский,  
А.В. Клоков, Ю.И. Буянов, С.Э. Шипилов, В.П. Якубов

R. Satarov, I. Kuzmenko, T. Muksunov, E. Balzovsky,  
A. Klovok, Yu. Buyanov, S. Shipilov, V. Yakubov

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
E-mail: sat.rail@sibmail.com

Приведено описание разработанной антенной решетки и результаты экспериментальных исследований ее составляющих.

(A description of the developed antenna array and the results of experimental studies of its components.)

### **Ключевые слова:**

Радиовидение, СШП излучение, антенная решетка.  
(Radiovision, UWB radiation, antenna array.)

Использование СШП излучения в системах радиовидения ставит жесткие требования к устройствам, используемых в этих системах по такому важному параметру как быстродействие. Полученные ранее результаты экспериментов с использованием механического сканирования [1-2] позволяют перейти к решению задачи радиотомографии в режиме реального времени.

Для достижения поставленной задачи, была разработана антенная решетка, состоящая из 22 элементов, где каждый представляет собой комбинированную антенну.

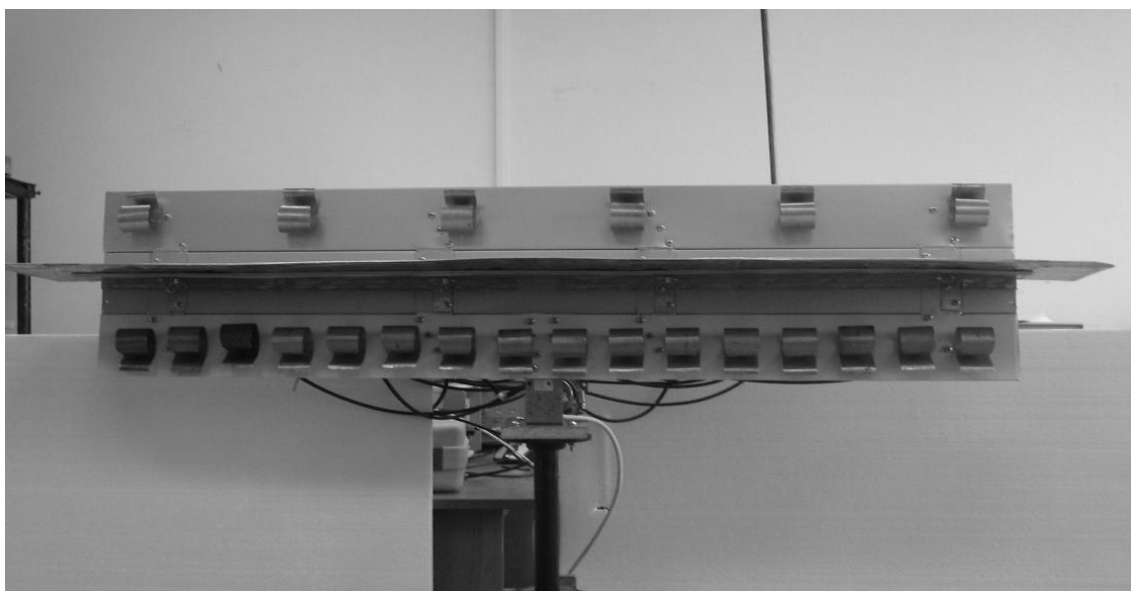


Рис. 1. Коммутируемая СШП антенная решетка.

Конструкция излучателя была предложена, доцентом кафедры радиофизики, Буяновым Ю.И. Ее неоспоримым достоинством является шестикратное увеличение полосы пропускания относительно аналогов, встречаемых в литературе.



На рисунке 2 представлены результаты измерения КСВ одного излучателя. Измерения проводились с использованием скалярного анализатора цепей P2M-18 фирмы НПФ «МИКРАН».

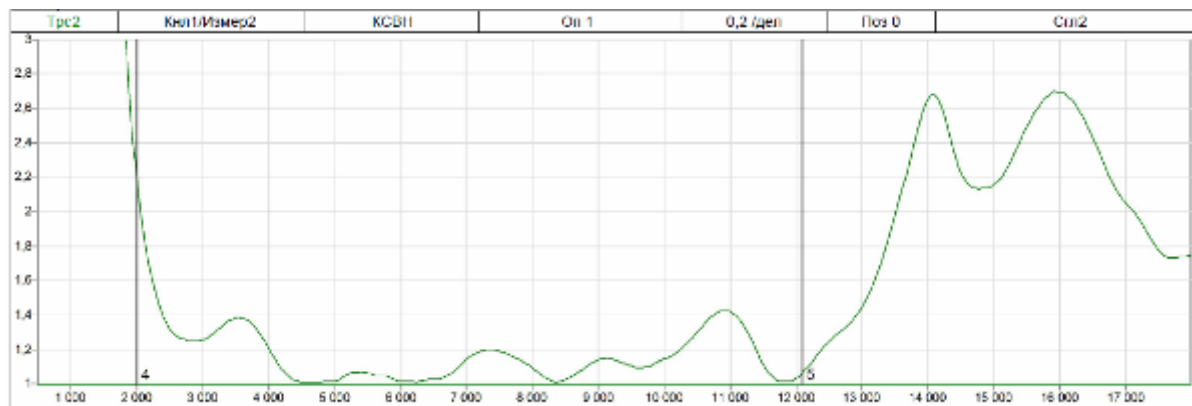


Рис. 2. КСВ.

При стандартном подходе к оценке согласования антенны КСВ должен быть меньше 2, как видно из представленного графика КСВ, разработанной антенны меньше 1,4 во всем диапазоне используемых нами частот.

Диаграмма направленности каждого излучателя в горизонтальной плоскости симметрична и составляет порядка  $90^\circ$  по уровню 0.7. Графическое же представление коэффициента направленного действия в вертикальной плоскости представляет собой определенный интерес, ввиду асимметричной формы каждой антенны. На представленном ниже рисунке 3 приведены ДН в вертикальной плоскости на разных частотах.

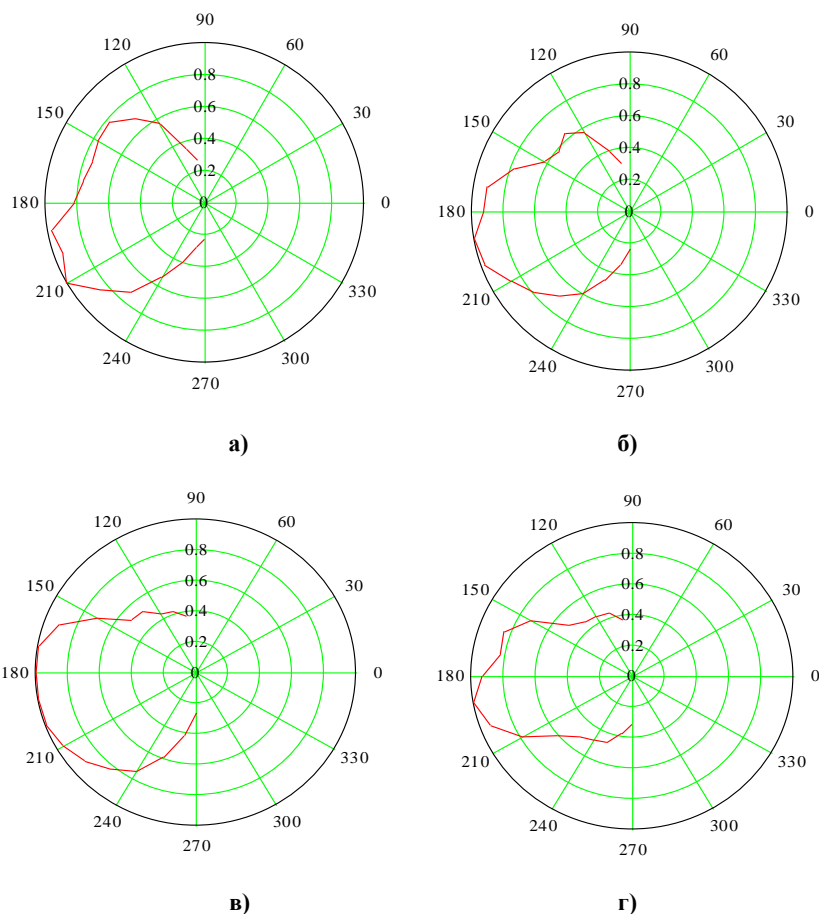


Рис.3. ДН на частотах: а) 4 ГГц б) 5 ГГц в) 6 ГГц г) 7 ГГц.

Благодаря столь удачной реализации каждый элемент хорошо согласован и имеет широкую ДН в обеих плоскостях.

Быстродействие системы достигается благодаря трем СШП переключателям, перекрывающим частотный диапазон до 18 ГГц. Развязка между каналами составляет 60 дБ, максимальное время переключения 15 мс. Для управления коммутаторами был разработан специальный блок. На передней стороне находятся индикаторная панель, где каждый светодиод соответствует номеру включенного канала.

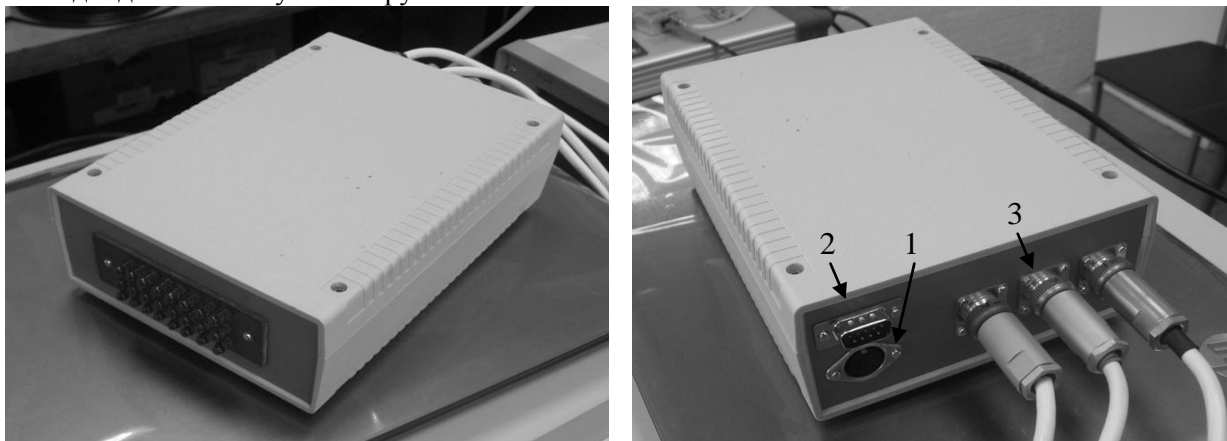


Рис.4. Блок коммутации каналов.

На фронтальной стороне располагаются разъемы под: питание(1), COM- порт(2) и кабели(3), через которые идет непосредственное управление коммутаторами.

На рисунке 5 представлена принципиальная схема коммутации каналов, реализованного на базе контроллера STM32F107.

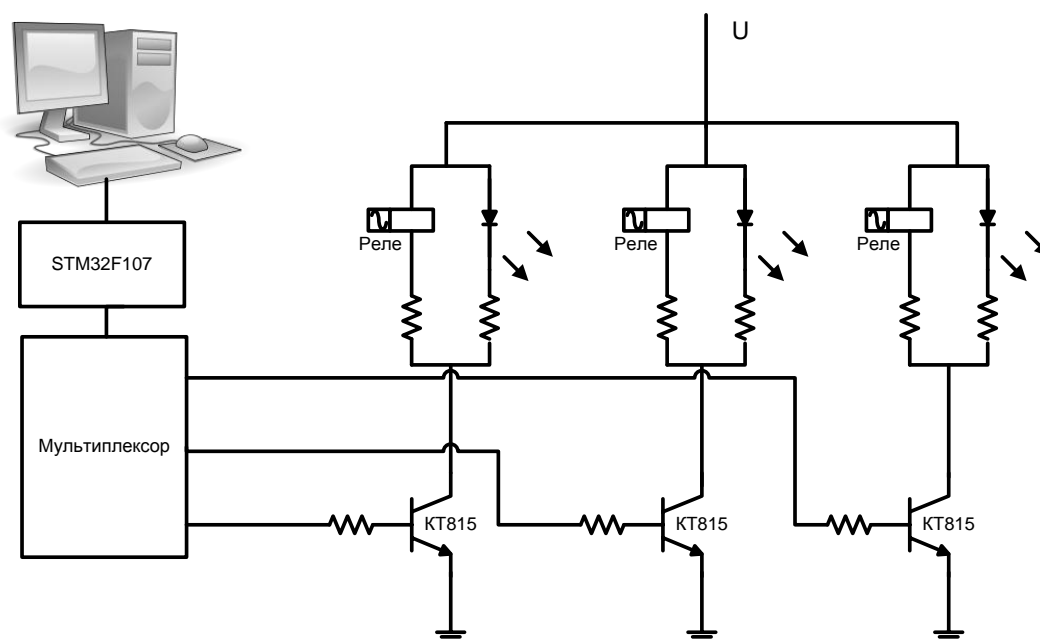


Рис. 5. Принципиальная схема коммутации каналов.

В системе в качестве линий передач использовались коаксиальные кабели марки RG-58. Коэффициент передачи линии длиной 55 см. представлен на рисунке 6.

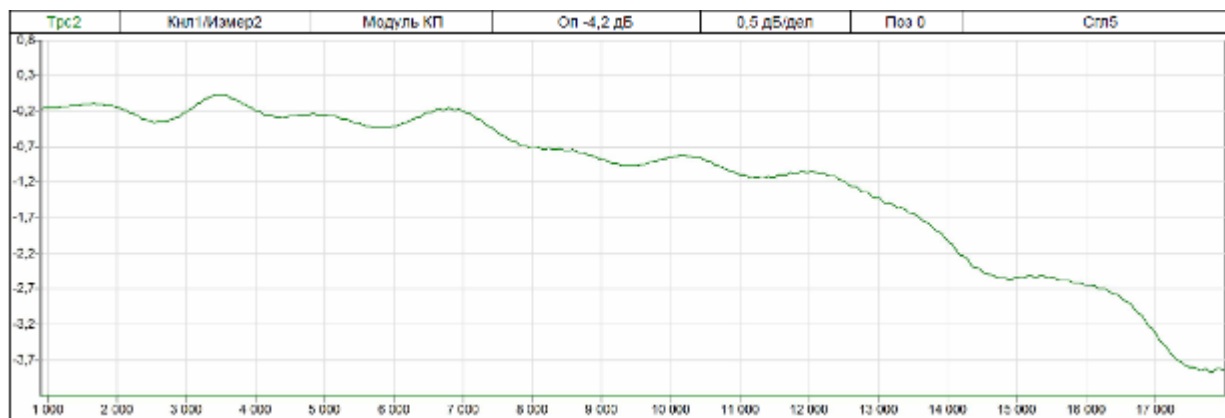


Рис. 6. КП линии передачи длиной 55 см.

Как видно из графика, затухание в диапазоне частот от 3 до 12 ГГц составляет -1.2 дБ.

Разработана коммутируемая СШП антенная решетка. Использование ее в системе радиовидения позволит в режиме реального времени решать задачи по обнаружению скрытых объектов. Благодаря комплексу решений по оптимизации коммутации каналов – уменьшено время сканирования. В конечном счете, использование решетки вкупе с методами математической фокусировки и разработанными ранее алгоритмами по обработке принятых сигналов позволят начать создание действующего макета радио томографа.

Работа выполнена при поддержке ФЦП в рамках мероприятия 1.1. (ГК № 14.740.11.0076).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якубов В.П., Склярчик К.Г., Пинчук Р.В., Суханов Д.Я., Булавинов А.Н., Бевецкий А.Д. Радиоволновая томография скрытых объектов для систем безопасности // Известия высших учебных заведений. Физика. 2008, № 10. - С. 63-79.

2. Якубов В.П., Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н. Сверхширокополосная томография движущихся объектов за диэлектрическими преградами // Контроль. Диагностика. – 2011. Специальный выпуск. С. 89-91.

#### Сведения об авторах:

**Сатаров Р.Н.:** Томск; ТГУ; аспирант; статрадиофизика, цифровая обработка сигналов и полей.

**Кузьменко И.Ю.:** Томск; ТГУ; аспирант; автоматизация эксперимента, программирование.

**Муксунов Т.Р.:** Томск; ТГУ; аспирант; автоматизация эксперимента, программирование.

**Балзовский Е.В.:** Томск; ТГУ; старший преподаватель; электродинамика, исследование антенных решеток.

**Клоков А.В.:** Томск; ТГУ; доцент; электродинамика, распространение радиоволн.

**Буянов Ю.И.:** Томск; ТГУ; доцент; электродинамика, исследование антенных решеток.

**Шипилов С.Э.:** Томск; ТГУ; доцент; статрадиофизика, цифровая обработка сигналов и полей.

**Якубов В.П.:** Томск; ТГУ; профессор; электродинамика, статрадиофизика, цифровая обработка сигналов и полей.

УДК 621.391.244

## РАДИОВИДЕНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОВОЛНОВЫХ ДОПЛЕРОВСКИХ ДАТЧИКОВ (RADIO-WAVE IMAGING USING MICROWAVE DOPPLER SENSORS)

И.С. Федянин, И.Ю. Кузьменко, С.Э. Шипилов, В.П. Якубов  
I. Fedyanin, I. Kuzmenko, S. Shipilov, V. Yakubov

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
E-mail: vanyaff@sibmail.com

Исследование проникающей и разрешающей способностей излучения микроволновых датчиков антенной решетки.

(The study of ionizing radiation and the resolution of the microwave sensor array.)

### Ключевые слова:

Радиовидение, антенная решетка.

(Radio-wave imaging, antenna array.)

Микроволновые доплеровские датчики выбраны, как недорогостоящие приемопередающие элементы антенной решетки, для реализации общедоступного ручного радиоволнового сканера для поиска скрытых объектов под одеждой или в багаже гражданина в местах большого скопления людей. Для доказательства применимости датчиков проводится исследование проникающей и разрешающей способностей их радиоволнового излучения.

Для исследования проникающей способности радиоизлучения датчиков антенной решетки была собрана установка, состоящая из подвижной площадки и, размещенного на ней, приемопередающего доплеровского датчика перемещений, частота излучения которого равна 24 ГГц (рис. 1). Движение площадки обеспечивается электроприводом.

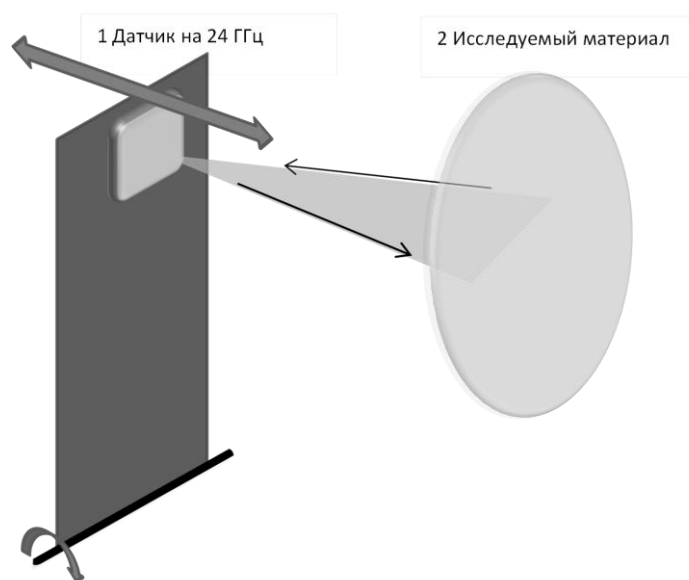


Рис. 1. Установка для измерения проникающей способности радиоизлучения датчиков.

На рисунке 2 показаны фрагменты сигналов, полученные в результате возвратно-поступательного движения датчика. Максимальный уровень, соответствующих аналитических сигналов позволяет судить о прозрачности исследуемых материалов.

Металлическая пластина полностью отражает радиоизлучение датчика. С учетом двукратного ослабления излучения слоем материала, получаем, что корень отношения

максимального значения амплитуды аналитического сигнала исследуемого материала  $\max(Z_m)$  к максимальному значению амплитуды аналитического сигнала металлической пластины  $\max(Z_{Me})$ , даёт значение коэффициента прохождения на частоте 24 ГГц:

$$W_{24} = \sqrt{\frac{\max(Z_m)}{\max(Z_{Me})}}$$

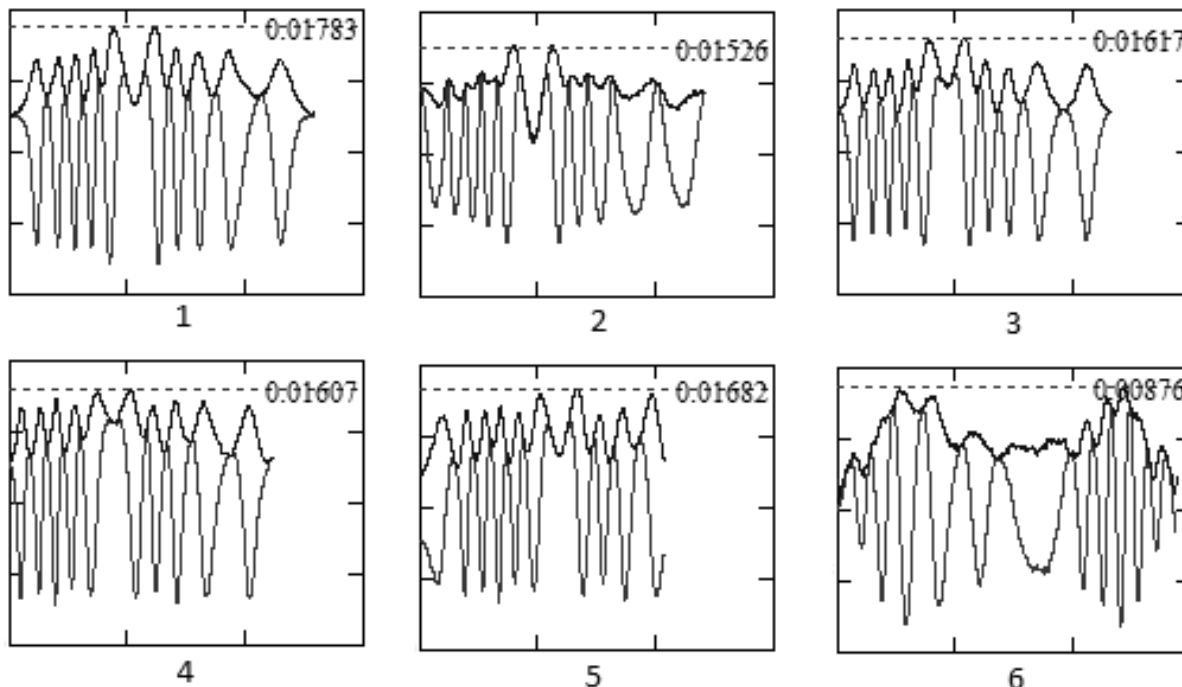


Рис. 2. Фрагменты сигналов и соответствующие амплитуды аналитических сигналов.

На рисунке 3 показаны значения коэффициентов прохождения радиоизлучения для материалов, из которых чаще всего изготавливается ручная кладь и которые встречаются на теле человека. Эти материалы обычно не обладают частотной дисперсией, т.е. их электрофизические свойства (диэлектрическая проницаемость и проводимость) в радиодиапазоне не зависят от частоты. Кроме того, эти среды обладают малой отражающей и малой поглощающей способностью.

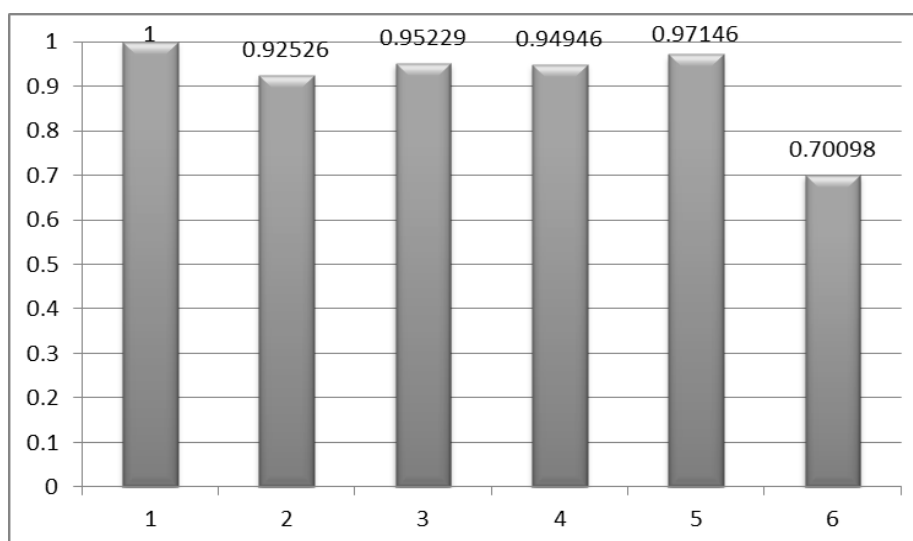


Рис.3. Коэффициент прохождения исследуемых материалов на частоте 24 ГГц:  
1 – Свободное пространство, 2 – Фанера толщиной 0.5 см, 3 – Ткань из микрофибры, 4 – Пенопласт толщиной 2.5 см, 5 – Поролон 2 см, 6 – Книга толщиной 2.7 см

Таким образом, на частоте 24 ГГц коэффициент прохождения (передачи) имеет значение не менее  $W_{24} = 0,7$ . Это означает, что коэффициент прохождения на данной частоте для перечисленных материалов близок к единице. Можно сделать вывод, что в обычных условиях одежда не является серьезной преградой для выбранной в экспериментах частоты 24 ГГц.

С помощью высокоточного инкрементного энкодера была собрана установка, которая позволила оценить разрешающую способность излучения датчика. Перемещая датчик над исследуемым объектом (линейкой) и применяя алгоритм согласованной фильтрации было получено его одномерное радиоизображение (рис. 4). Исходя из полученного результата, можно сделать вывод, что предполагаемая разрешающая способность излучения датчиков антенной решетки, по уровню -3Дб, будет не менее 1 см.

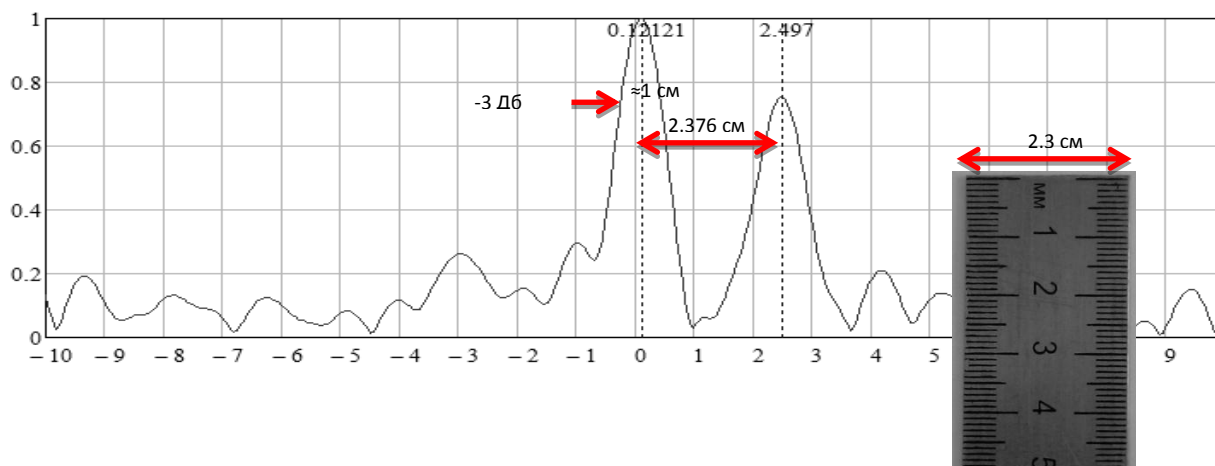


Рис.4. Радиоизображения исследуемого объекта.

Проведенное исследование показало, что влияние материалов одежды и багажа на коэффициент прохождения радиоизлучения на частоте 24 ГГц незначительно, а с помощью применённого алгоритма обработки сигнала можно распознать достаточно мелкие объекты. Это означает практическую применимость выбранных датчиков для поиска и визуализации объектов, скрытых под одеждой или в багаже человека.

Работа выполнена при поддержке ФЦП в рамках мероприятия 1.1. (ГК № 14.740.11.0076).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якубов В.П., Склярчик К.Г., Пинчук Р.В., Суханов Д.Я., Булавинов А.Н., Бевецкий А.Д. Радиоволновая томография скрытых объектов для систем безопасности // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2008. – № 10. – С. 63-79.

2. Якубов В.П., Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н. Сверхширокополосная томография движущихся объектов за диэлектрическими преградами // Контроль. Диагностика. – 2011. Специальный выпуск. С. 89-91.

### Сведения об авторах:

**Федянин И.С.:** Томск; ТГУ; аспирант; статрадиофизика, программирование, проведение экспериментов, цифровая обработка сигналов и полей.

**Кузьменко И.Ю.:** Томск; ТГУ; аспирант; автоматизация эксперимента, программирование.

**Шипилов С.Э.:** Томск; ТГУ; доцент; статрадиофизика, цифровая обработка сигналов и полей.

**Якубов В.П.:** Томск; ТГУ; профессор; электродинамика, статрадиофизика, цифровая обработка сигналов и полей.

УДК 621.391.244

**КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ РАДИО И УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ  
ЛОКАЦИОННОЙ ТОМОГРАФИИ  
(INTEGRATION OF RADIO AND ULTRASONIC RADIATION FOR RADAR IMAGING)**

С.Э. Шипилов, Д.Я. Суханов, В.П. Якубов  
S. Shipilov Sergey, D. Suhanov, V. Yakubov

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
E-mail: shipilov@webmail.tsu.ru

Данная работа имеет своей целью представить результаты испытаний томографической системы по совместному использованию электромагнитного и ультразвукового излучения для обнаружения и визуализации скрытых объектов.

(This paper aims to present the results of tests of tomographic systems for the joint using of electromagnetic radiation and ultrasound for the detection and visualization of hidden objects.)

**Ключевые слова:**

Радиотомография, ультразвуковое зондирование, сверхширокополосное зондирование, синтезирование апертуры, фокусировка излучения.

(Radiotomography, ultrasonic sensing, ultra-wideband sensing, synthetic aperture, focusing of radiation.)

По целому ряду причин при разработке бесконтактных средств обнаружения запрещенных предметов в ручной клади и под одеждой предпочтение должно быть отдано радиоволновым системам. Во-первых, радиоволны практически полностью безвредны и не приводят к негативным последствиям для здоровья людей. В этом их существенное отличие от рентгеновского излучения. Во-вторых, потенциально очень широк спектр применений этих систем: использование в местах сосредоточения больших людских потоков, применение в ходе спецопераций для обнаружения и слежения за перемещениями людей, скрывающихся за стенами зданий, обнаружение пострадавших после чрезвычайных происшествий и т.д.

Электромагнитное излучение взаимодействует с электрофизическими неоднородностями сред распространения. Акустическое излучение при зондировании неоднородностей в отличие от электромагнитного излучения взаимодействует преимущественно с контрастами плотности. В этом смысле использование, например, ультразвука для томографии неоднородных сред открывает широкий спектр дополнительных возможностей, в частности, для определения типа вещества, из которого изготовлены скрытые предметы. Комплексирование радио и акустического зондирования создает реальные возможности, например, для диагностики взрывчатых веществ.

Настоящая работа имеет своей целью представить результаты испытаний томографической системы по совместному использованию электромагнитного и ультразвукового излучения для обнаружения и визуализации скрытых объектов.

В предшествующих работах [1-3] авторами были разработаны физико-математические модели системы восстановления изображений скрытых объектов на основе томографической обработки результатов многокурсовых дистанционных измерений рассеянного радио и ультразвукового волнового излучения. Полученные экспериментальные результаты по локационному зондированию пластикового пистолета с использованием электромагнитных сверхширокополосных (СШП) импульсов длительностью 0,2 нс и ультразвукового излучения (УЗИ) в диапазоне 37-42 КГц представлены на рис. 1. Из рисунка видно, что УЗИ изображение имеет более высокое разрешение, чем СШП радиоизображение. Это объясняется тем, что центральная длина волны УЗИ и СШП излучения составила, соответственно 0,8 см и 6 см. На рисунке видны детали пистолета для СШП радиоизображения порядка 3 см, а для УЗИ около

0,4 см, что позволяет говорить о разрешающей способности метода, равной половине длины волны используемого излучения.

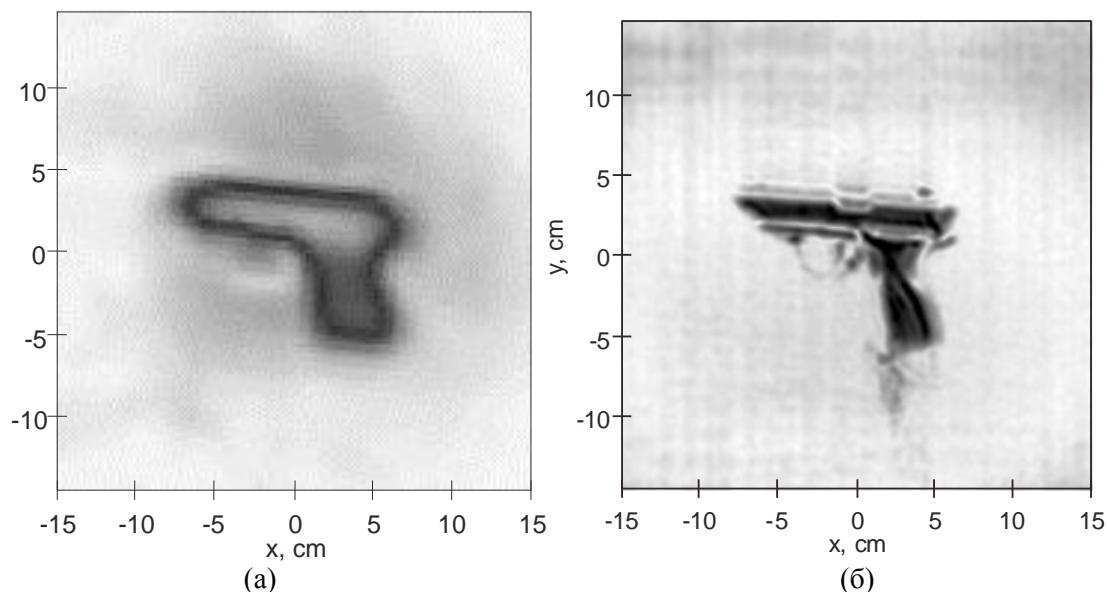


Рис. 1. Восстановленное изображение объекта с использованием СШП излучения (а) и УЗИ (б)

Приведенные результаты подтверждают перспективность использования ультразвука для локационной томографии малоразмерных объектов.

Как уже отмечалось выше, УЗИ взаимодействует главным образом с неоднородностями в плотности вещества. При дистанционном зондировании сред это даёт дополнительную информацию о материале вещества, из которого состоят неоднородности. Использование электромагнитных волн позволяет контролировать электрофизические свойства вещества. Совместное использование электромагнитных и акустических волн даёт возможность отличать, например, твердые и жидкие среды. Так известно, что для твердых веществ имеет место эмпирическая формула

$$\rho = 2(n-1), \text{ или } n = [\rho/2 + 1],$$

Где  $\rho$  - плотность и  $n = \sqrt{\varepsilon}$  - коэффициент преломления вещества. Соответствующая этому зависимость показана наклонной прямой на рис. 2.

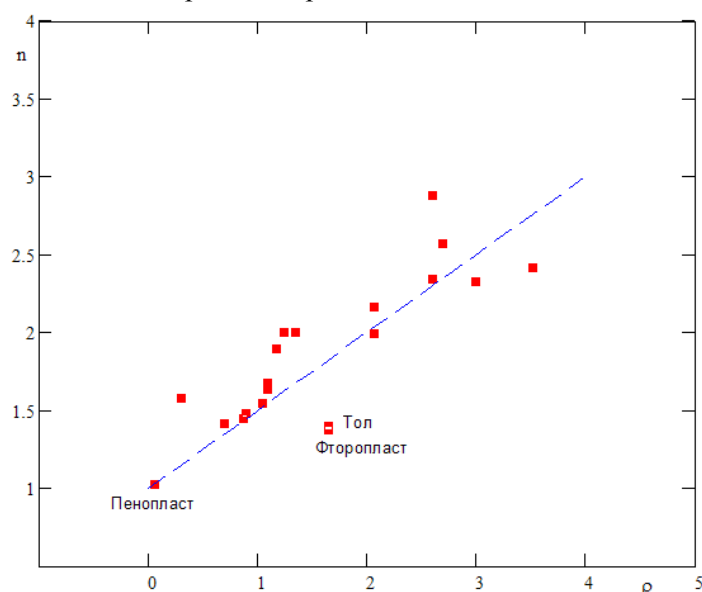


Рис. 2. Диаграмма соответствия коэффициента преломления и плотности для некоторых твердых веществ.



Здесь же точками показаны соответствующие значения для конкретных твердых веществ. Все эти значения приведены в таблице 1. Более плотным веществам соответствуют большие значения коэффициента преломления.

Таблица 1. Значения коэффициента преломления и плотности для твердых веществ

| Вещество   | Плотность, Г/см <sup>3</sup> | Коэффициент преломления |
|------------|------------------------------|-------------------------|
| Пенопласт  | 0,06                         | 1,022741                |
| Дерево     | 0,3                          | 1,581139                |
| Бумага     | 0,7                          | 1,414214                |
| Парафин    | 0,87                         | 1,449138                |
| Полиэтилен | 0,9                          | 1,48324                 |
| Полистирол | 1,05                         | 1,549193                |
| Асфальт    | 1,1                          | 1,637071                |
| Янтарь     | 1,1                          | 1,67332                 |
| Плексиглас | 1,18                         | 1,897367                |
| Текстолит  | 1,25                         | 2                       |
| Винипласт  | 1,35                         | 2                       |
| Фторопласт | 1,65                         | 1,378405                |
| Тол        | 1,654                        | 1,4                     |
| Кварц      | 2,07                         | 2,165641                |
| Сера       | 2,07                         | 1,994994                |
| Мрамор     | 2,6                          | 2,880972                |
| Флогопит   | 2,6                          | 2,345208                |
| Шифер      | 2,7                          | 2,569047                |
| Стекло     | 3                            | 2,32379                 |
| Алмаз      | 3,515                        | 2,42                    |

Если произвести нормировку приведенных значений по формуле  $g = n[\rho/2 + 1]^{-1}$ , то представленные значения представляются в более наглядном виде, показанном на рис. 3. Приведенная выше эмпирическая зависимость переходит при этом в прямую  $g = 1$ .

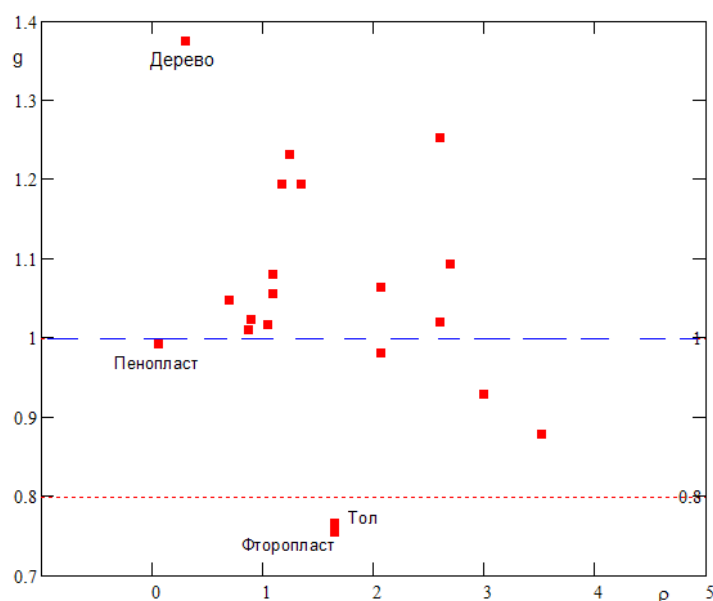


Рис. 3. Нормированная диаграмма соответствия коэффициента преломления и плотности для некоторых твердых веществ.

Интересным является то, что тол со своими значениями лежат на приведенной диаграмме в самом низу, заметно отличаясь от других веществ. Близкое положение занимает фторопласт. Это говорит о том, что фторопласт можно использовать для имитации тола в лабораторных условиях, а на практике для разделения этих веществ необходимо будет привлекать еще восстановление формы соответствующих объектов.

В случае жидких веществ коэффициент преломления, как правило, имеет заметно большие значения, чем твердые вещества, поэтому на диаграмме соответствия жидкости могут легко идентифицироваться. Кроме того, у жидкостей электрофизические параметры имеют характерный температурный ход, что также может быть использовано для их идентификации.

Так или иначе, использование УЗИ зондирования даст дополнительную информацию о веществе и потому становится важным разработку технологии для выполнения ультразвуковой томографии и видения неоднородных сред и объектов на основе метода синтеза большой апертуры.

Для выполнения совместного сверхширокополосного радиоволнового и ультразвукового зондирования неоднородных сред был разработан и изготовлен двухкоординатный сканер, который управлялся с использованием вычислительной машины. Измерительная головка содержала в себе две СШП антенны (передающую и приемную), разделенные экранами для уменьшения взаимного влияния. Для зондирования использовались сверхкороткие импульсы без несущей с длительностью 200 пс. Измерения выполнялись с использованием стробоскопического осциллографа.

В этой же измерительной головке располагались 4 однотипных ультразвуковых излучателя, два из которых использовались для передачи и два для приема ультразвуковых сигналов. Частота зондирующих сигналов изменялась в полосе от 35 до 45 кГц. Для взаимной развязки излучателя и приемника использовался войлочный материал. Генерация зондирующих сигналов и регистрация отраженных от тестовых объектов сигналов производилась с помощью специальной звуковой карты компьютера.

Для проверки эффективности совместного использования радиоволн и ультразвука был выбран тестовый объект, показанный на рис. 4а. Размер ступенчатого треугольника из гипсокартона – 15 см, размер ступеньки – 5 см, размер отверстия в нем - 2х2 см. На рис. 4б показан этот же объект, спрятанный за полупрозрачной металлизированной сеткой. Важно, что для радиоизлучения сетка практически непрозрачна.

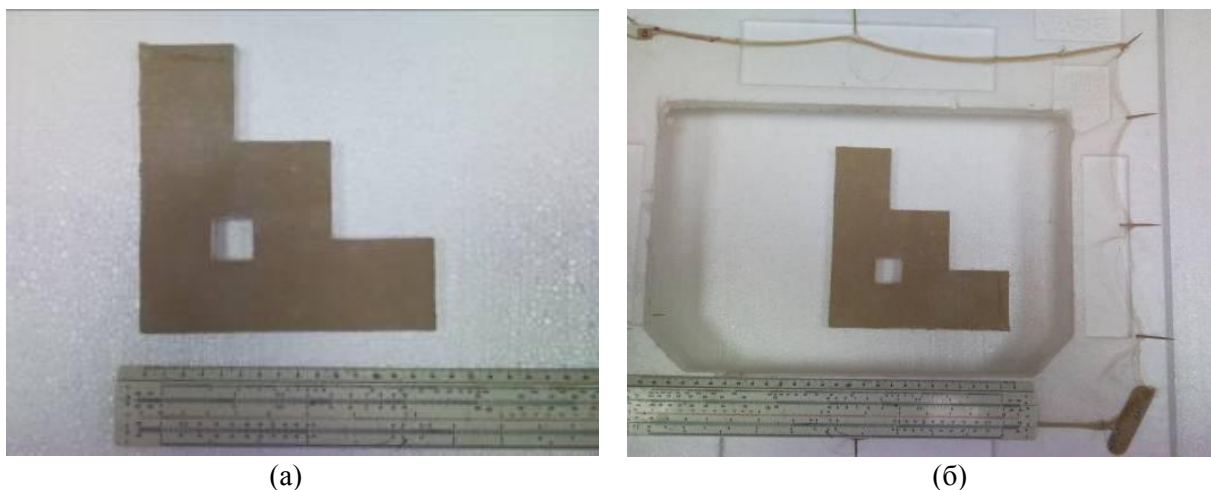


Рис. 4. Тестовый объект без преграды (а), за металлической сеткой (б) .

Для обработки данных зондирования и 3D томосинтеза использована разработанная исполнителями технология синтеза апертуры с фокусировкой. Детальное описание этой процедуры дано в работах [1-3]. Важным является, что томосинтез для СШП импульсов и УЗИ осуществляется по одним и тем же алгоритмам. Полученные изображения представлялись как на разных экранах, так и на одном экране в цветном виде.

На рисунке 5 показаны результаты, полученные со ступенчатым треугольником, установленным на расстоянии 1 м от сканера. Зондирование проводилось с шагом 2 см.

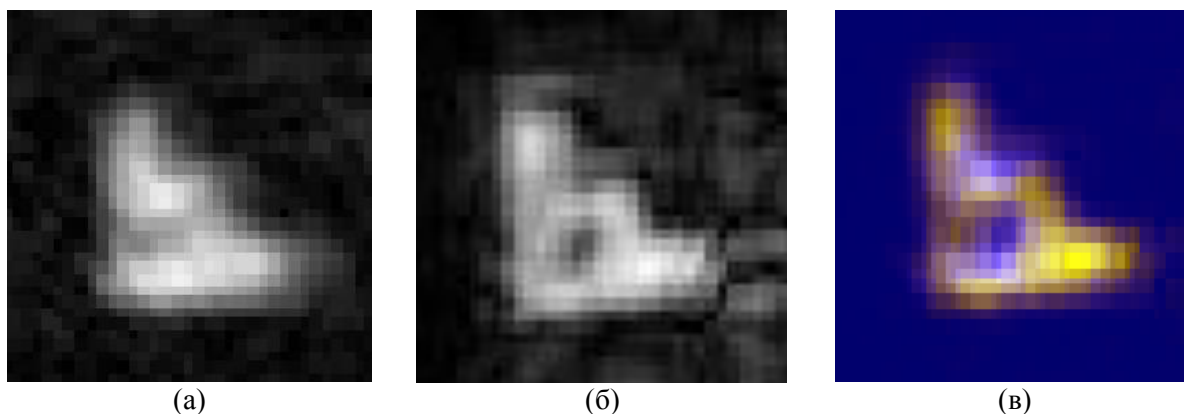


Рис. 5. Томограмма ступенчатого треугольника: с использованием СШП излучения (а); с использованием УЗИ (б); комплексное изображение (в).

Были рассмотрены три варианта комбинирования СШП и УЗИ изображений: произведение, сумма и разность. Комплексное (цветное) изображение было получено, когда в схеме RGB (красный-голубой-синий) красному цвету было сопоставлено просто произведение, голубому – произведение произведения и суммы, голубому - произведение произведения и разности. Видно, что сами по себе СШП и УЗИ изображения для гипсокартона приблизительно равнозначны. Комплексное же изображение более контрастно и однозначно: на нем более отчетливо видны ступеньки по 5 см каждая, и даже видимо маленькое окно с размером 2x2 см.

На рисунке 6 показаны результаты, когда расстояние до тестового объекта было сокращено до 0,5 м, но сам объект (ступенчатый треугольник) был помещен за металлизированную сетку (т.н. сетеполотно).

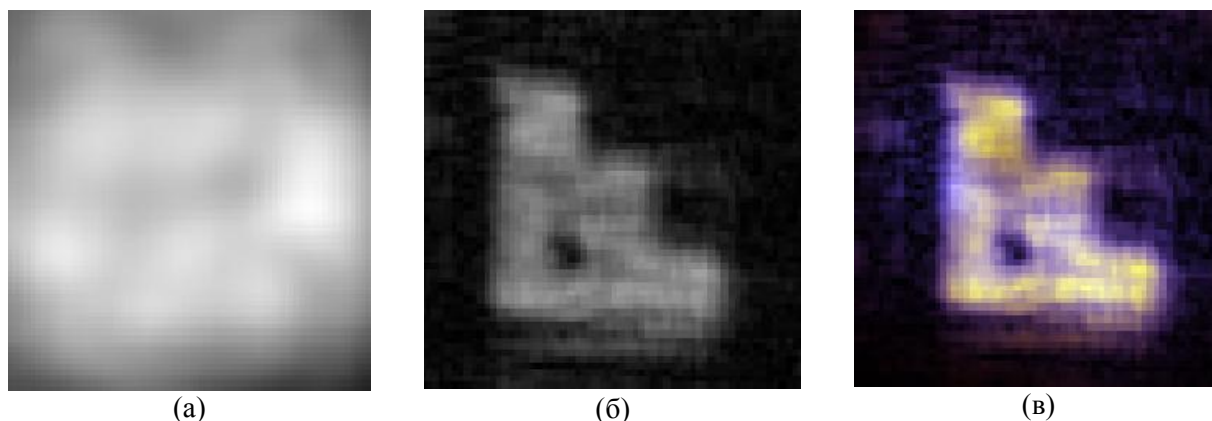


Рис. 6. Томограмма ступенчатого треугольника, помещенного за металлизированную сетку: с использованием СШП излучения (а); с использованием УЗИ(б); комплексное изображение (в)

Как показали исследования, сетеполотно имеет коэффициент отражения для радиоволн порядка 0,9. Таким образом, сетеполотно хорошо экранирует тестовый объект от радиоволн. Для УЗИ сетеполотно почти полностью прозрачно (коэффициент прохождения 0,9), и получаемое изображение вполне приемлемо для распознавания. Комплексное изображение еще более контрастно.

Приведенные выше, а также другие полученные результаты с металлическими и пенопластовыми тестовыми объектами позволяют сделать следующие выводы:

Комплексирование изображений тестового объекта в радиоволнах и в ультразвуке на одном экране позволяет по интегральному восприятию судить о материале зондируемого объекта без дополнительной обработки. Подобный эффект наблюдается при поэлементном перемножении изображений, и при этом заметно увеличивается разрешающая способность.

Совместное использование радиоволн и ультразвука позволяет повысить информационность получаемых изображений, как по разрешению, так и по возможности идентификации материала зондируемого объекта. Радиоволны обеспечивают проникающую способность излучения, например, под одежду, а ультразвук повышает однозначность идентификации материала скрытого объекта. Для полного раскрытия возможностей этого подхода требуется отдельное исследование по множеству материалов при использовании обучающихся алгоритмов. Здесь чем больше будет объем накопленного банка данных, тем выше вероятность правильной идентификации материала.

Работа выполнена при поддержке ФЦП в рамках мероприятия 1.1. (ГК № 14.740.11.0076).

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Якубов В.П., Склярчик К.Г., Пинчук Р.В., Суханов Д.Я., Булавинов А.Н., Бевецкий А.Д. Радиоволновая томография скрытых объектов для систем безопасности // Известия высших учебных заведений. Физика. 2008, № 10. - С. 63-79.
2. Якубов В.П., Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н. Сверхширокополосная томография движущихся объектов за диэлектрическими преградами // Контроль. Диагностика. – 2011. Специальный выпуск. С. 89-91.
3. Якубов В.П., Шипилов С.Э., Суханов Д.Я. Микроволновая томография радионепрозрачных объектов // Дефектоскопия. №11, 2011. с. 188-201

**Сведения об авторах:**

УДК 621.391.244

## УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СИСТЕМА 3D ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ (ULTRASOUND SYSTEM 3D POSITIONING)

И.Ю. Кузьменко, С.Э. Шипилов, В.П. Якубов  
I. Kuzmenko, S. Shipilov, V. Yakubov

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
E-mail: kuzmenko@sibmail.com

В работе представлена методика определения расстояния с помощью ультразвука, а также приведены результаты эксперимента по измерению расстояния с помощью предлагаемой методики.  
(In this article presents method for measuring distance using ultrasound wave. Results of experimental investigations are presented.)

### Ключевые слова:

Позиционирование, измерение расстояния.  
(Positioning, distance measurement.)

### Введение

Существующие в настоящее время ультразвуковые датчики позволяют определять расстояние с определенной точностью. В таблице 1 приведены параметры некоторых ультразвуковых датчиков. Датчики работают на разных частотах и имеют разную разрешающую способность, что затрудняет сравнение датчиков между собой. Также неизвестны алгоритмы, используемые для определения расстояния. В качестве параметра для сравнения выбрано отношение длины волны к разрешающей способности  $N = \lambda / r$ . Большее значение данного параметра означает более высокое качество датчика (более высокая разрешающая способность при равной рабочей частоте).

На лабораторном макете достигнута разрешающая способность 1 миллиметр, при использованной длине волны ультразвукового излучения  $\lambda = 8,25$  мм ( $N = 8,25$ ).

Таблица 1

| Название датчика | Разрешение $r$ (мм) | Частота $f$ (кГц) | Длина волны $\lambda$ (мм) | $N = \lambda / r$ |
|------------------|---------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|
| SICK UM 30-1111  | 0,36                | 320               | 1,03                       | 2,86              |
| SICK UM 30-1211  | 0,36                | 400               | 0,82                       | 2,29              |
| SICK UM 30-1311  | 0,36                | 200               | 1,65                       | 4,58              |
| MIC+25           | 0,18                | 320               | 1,03                       | 5,73              |
| Ballaf BUS M18   | 0,2                 | 330               | 1                          | 5                 |

### Решение задачи определения расстояния

Для проверки работоспособности предлагаемой методики был собран лабораторный макет, представленный на рисунке 1. В лабораторном макете используются датчики японской фирмы Murata Manufacturing. Рабочая частота датчика 40 кГц, полоса пропускания 38-42 кГц. Диапазон напряжений 0-20 В.

Для автоматизации эксперимента применена плата управления на основе микроконтроллера STMicroelectronics STM32F207. Микроконтроллер генерировал

возбуждающий сигнал, оцифровывал принимаемый сигнал, выполнял математическую обработку принятого сигнала для определения расстояния.

На рисунке 2 представлен импульсный усилитель для увеличения амплитуды возбуждающего сигнала до 20 вольт. На рисунке 3 представлен двухкаскадный операционный усилитель для увеличения амплитуды регистрируемого сигнала.

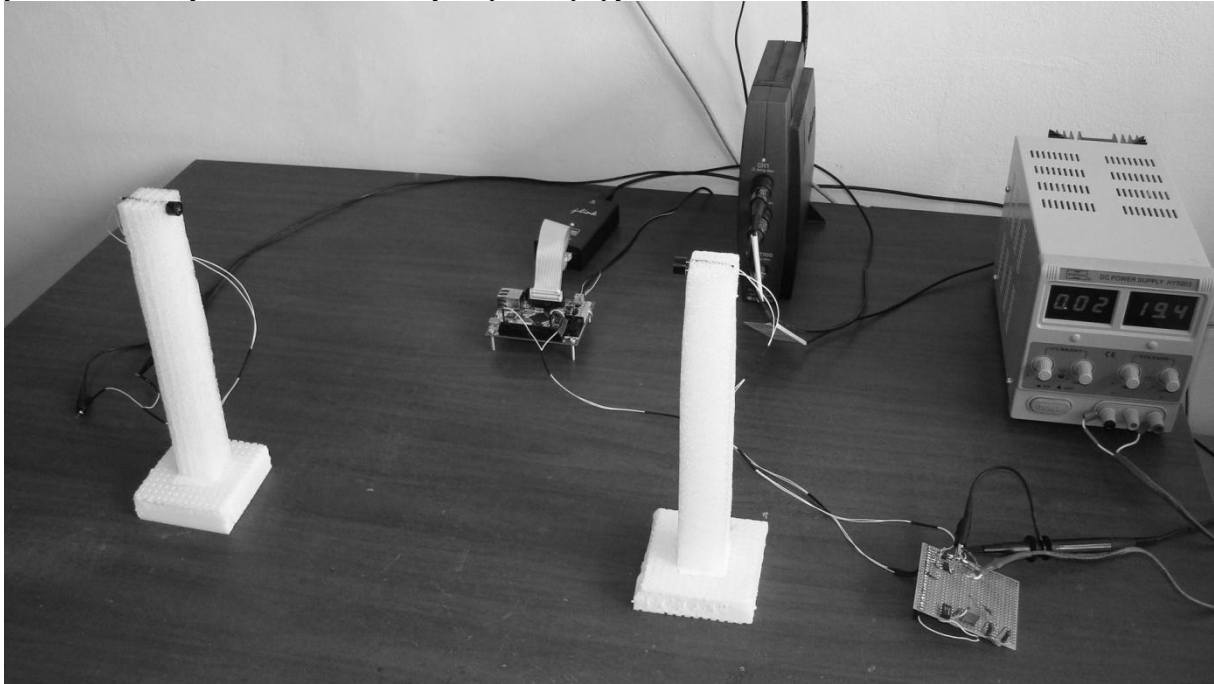


Рис. 1. Вид лабораторной установки.

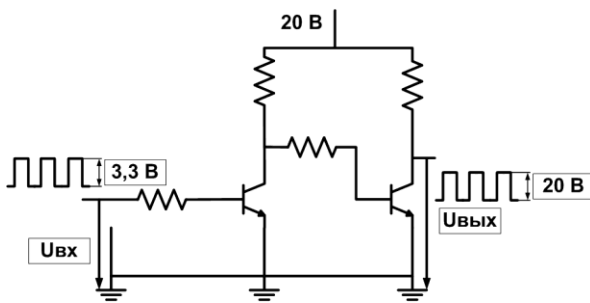


Рис. 2. Схема усилительного каскада для возбуждающего сигнала.

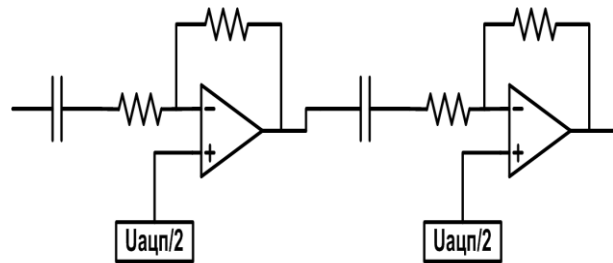


Рис. 3. Схема усилительного каскада для принимаемого сигнала.

На рисунке 4 представлена нормированная форма возбуждаемого ультразвуковой датчик сигнала (1) и нормированная форма регистрируемого сигнала (2).

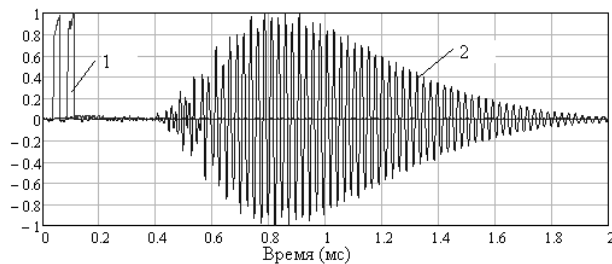


Рис. 4. Форма возбуждаемого и принимаемого сигнала.

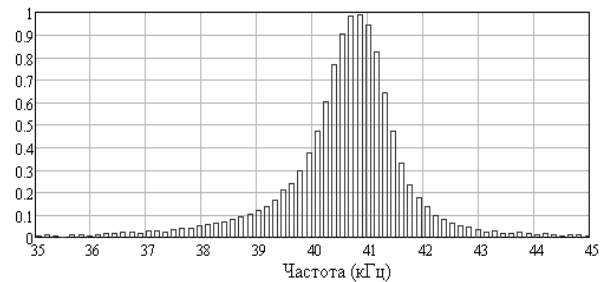


Рис. 5. Нормированная АЧХ принимаемого сигнала.

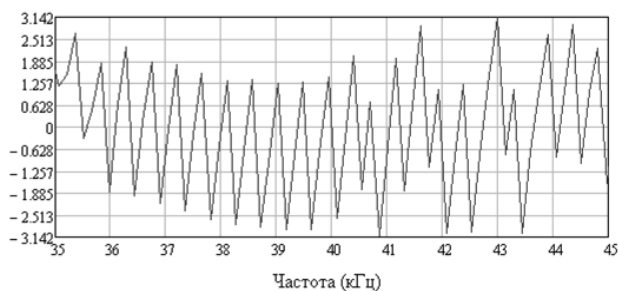


Рис. 6. ФЧХ принимаемого сигнала.

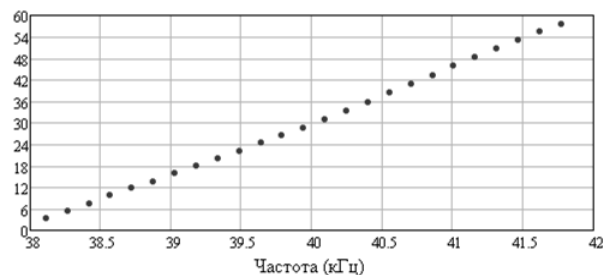


Рис. 7. Линеаризованная ФЧХ принимаемого сигнала.

Из рисунка 5 видно, что принимаемый сигнал имеет богатый спектр гармоник около центральной частоты датчика. Фаза ультразвуковой волны, приходящей в точку приема, определяется выражением

$$\varphi = \frac{2\pi f}{c} r, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость звука в среде,  $r$  – расстояние между датчиками.

Из формулы 1 видно, что фаза с увеличением частоты линейно возрастает при условии, что расстояние между точками приема и излучения остается неизменным. Отсюда можно сделать вывод, что угол наклона фазы к оси частот  $d\varphi/df$  определяет расстояние между датчиками.

$$r = \frac{d\varphi}{df} \frac{c}{2\pi}$$

На рисунке 3 представлена фазочастотная характеристика принимаемого сигнала, после линеаризации ФЧХ принимает вид, изображенный на рисунке 4. Используя метод наименьших квадратов можно определить угол наклона прямой к оси частот и определить расстояние между датчиками.

С целью экспериментальной проверки методики собран лабораторный макет. На макете проводилось перемещение источника излучения к приемнику с постоянной скоростью. В процессе перемещения измерялось расстояние между источником и приемником, также проводилась обработка полученных данных. Далее представлены результаты обработки.

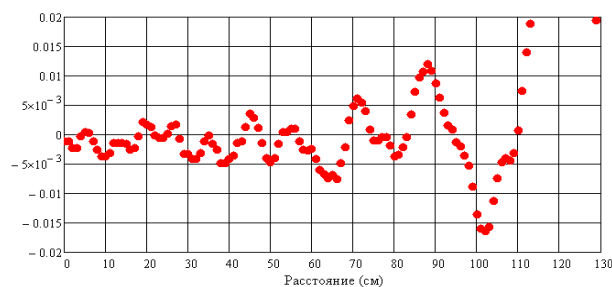


Рис. 8. Ошибка измерения расстояния при использовании метода – согласованной фильтрации.

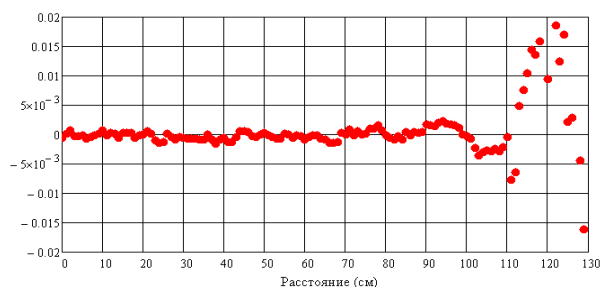


Рис. 9. Ошибка измерения расстояния при использовании предлагаемой методики.

На рисунке 8 изображена погрешность при определении расстояния в зависимости от величины измеряемого расстояния при использовании метода согласованной фильтрации, который применяется при решении подобных задач. На рисунке 9 изображен результат применения разработанной методики. Из данных графиков видно, что применение предлагаемой методики позволяет получать более точные результаты при определении расстояния. На расстояниях до 1 м удалось получить погрешность измерения расстояния 1 мм. При дальнейшем увеличении расстояния, (более 1 м) погрешность определения расстояния резко увеличивается, что связано с уменьшением отношения сигнал\шум. На данный момент на

кафедре радиофизики совершенствуется лабораторный макет. В дальнейшем, при использовании предложенной методики, макет будет способен измерять расстояния до 3 м с погрешностью 1 мм.

Работа выполнена при поддержке ФЦП в рамках мероприятия 1.1. (ГК № 14.740.11.0076).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. – М.: Иностранной литературы, 1957. – 623с.

2. Балдаев Р., Раджендран В., Паланичами П. Применение ультразвука М.: Техносфера, 2006. – 289с.

#### **Сведения об авторах:**

**Кузьменко И.Ю.:** Томск; ТГУ; аспирант; статрадиофизика, цифровая обработка сигналов и полей.

**Шипилов С.Э.:** Томск; ТГУ; доцент; статрадиофизика, цифровая обработка сигналов и полей.

**Якубов В.П.:** Томск; ТГУ; профессор; электродинамика, статрадиофизика, цифровая обработка сигналов и полей.



УДК 621.391.244

## МЕТАМАТЕРИАЛ ДЛЯ МИКРОВОЛН (MICROWAVE METAMATERIAL)

А.С. Мироньчев, В.П. Якубов  
A. Miron'chev, V. Yakubov

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
E-mail: mironchev42@mail.ru

Приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования и численного моделирования способа фокусировки излучения при помощи плоскопараллельной пластины выполненной из метаматериала.

(The results of theoretical and experimental research and numerical simulation method of focusing light using a plane-parallel plate made of a metamaterial.)

### Ключевые слова:

Метаматериал, фокусировка, численное моделирование, радиотомография.  
(Metamaterial, focus, numerical simulation, the radiotomography.)

Термин «метаматериал» предложил в 2000 году руководитель Центра электромагнитных материалов и устройств в Остине (штат Техас, США) Роджер Уолсер [1]. В том же году появилось первое сообщение о создании экзотической композитной среды с отрицательными значениями как диэлектрической, так и магнитной проницаемости (исследовательская группа Давида Смита из университета Дьюка в Дареме, штат Северная Каролина (США) [2]. Важно, что среда с такими параметрами имеет отрицательный коэффициент преломления  $n$ . Необычные свойства такой воображаемой среды - метаматериала ранее были известны только узкому кругу специалистов и наиболее обстоятельно описаны в статье советского физика Виктора Веселаго, опубликованной в журнале «Успехи физических наук» в 1967 году [3], т.е. почти за три десятилетия до появления самого понятия метаматериалов.

В настоящей работе приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования возможности создания метаматериала для радиодиапазона как искусственной композиционной среды, составленной из определенным образом ориентированных прямолинейных и кольцевых проводников (рис.1).

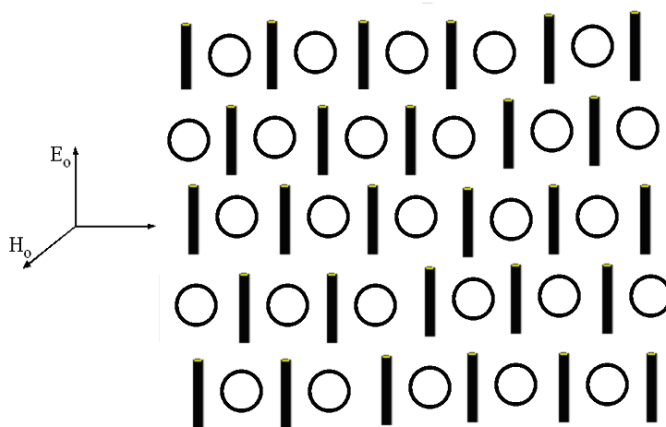


Рис.1. Падение плоской волны на композитную искусственную среду.

Диэлектрическая и магнитная проницаемость такой среды получаются как макропараметры, объединяющие поляризуемость и намагничиваемость отдельных проводников.

Такая среда может иметь отрицательный коэффициент преломления. Следствием необычного преломления на поверхности, разделяющей обычный диэлектрик и метаматериал, является эффект собирающей линзы, который наблюдается для плоскопараллельной пластины, выполненной из «левой» среды и помещенной в «правую» среду. В литературе достаточно подробно обсуждается возможность использования неотражающей пластины, т.н. идеальной «суперлинзы» с  $n = -1$ . В настоящей работе приводятся результаты численного эксперимента по фокусировке с использованием метаматериала с относительно произвольными значением  $n$ .

Плоскопараллельная неотражающая пластина с  $n = -1$  является совершенной линзой в том смысле, что для нее отсутствует дифракционный предел разрешающей способности. При этом фокусируются не только однородные, но и неоднородные плоские волны. Неоднородные волны исходят от источника и в обычной среде достаточно быстро убывают по амплитуде даже, если среда непоглощающая. При распространении в метаматериале неоднородные волны вносят существенный вклад в общее поле и, суммируясь на выходе слоя, дают лучшую фокусировку, чем в свободном пространстве. Для проверки данного утверждения было проведено численное моделирование фокусировки метаматериалом с учетом многократных переотражений излучения. Для тестирования правильности расчетов с учетом неоднородных волн проводилась дополнительная проверка результатов на соответствие теореме Пойнтинга.

На рис. 2а показан ход лучей при фокусировке на границу метаматериала. При этом коэффициент преломления не был равен по модулю показателю преломления фоновой среды, т.е. в этом случае присутствуют отражения от границ слоя метаматериала. Расчет поля за слоем метаматериала толщиной  $L$  может быть сделан согласно формуле Кирхгофа на основе формулы Вейля с разложением поля сферической волны по плоским волнам (1):

$$E(r) = \hat{F}^{-1} \left\{ \exp \left[ iL \sqrt{k_0^2 n^2 - \kappa_{\perp}^2} \right] \hat{F} \{ E(r_s) \} \right\}. \quad (1)$$

Здесь символы  $F$  и  $F^{-1}$  соответствуют операторам прямого и обратного преобразований Фурье. На рис. 2б показан результат расчета (численного эксперимента) эффекта фокусировки для случая  $n = -2 + 0,01i$ , с учетом переотражений. Рассматривался случай излучения двойного источника на частоте 10 ГГц, а фокусировка была достигнута при толщине слоя  $L=18$  см.

Кроме рассмотренного случая фокусировки излучения на границу слоя фокусировка может быть осуществляться за границу слоя - в свободное пространство подобно тому, как это происходит в случае с обычными собирающими линзами (рис. 3).

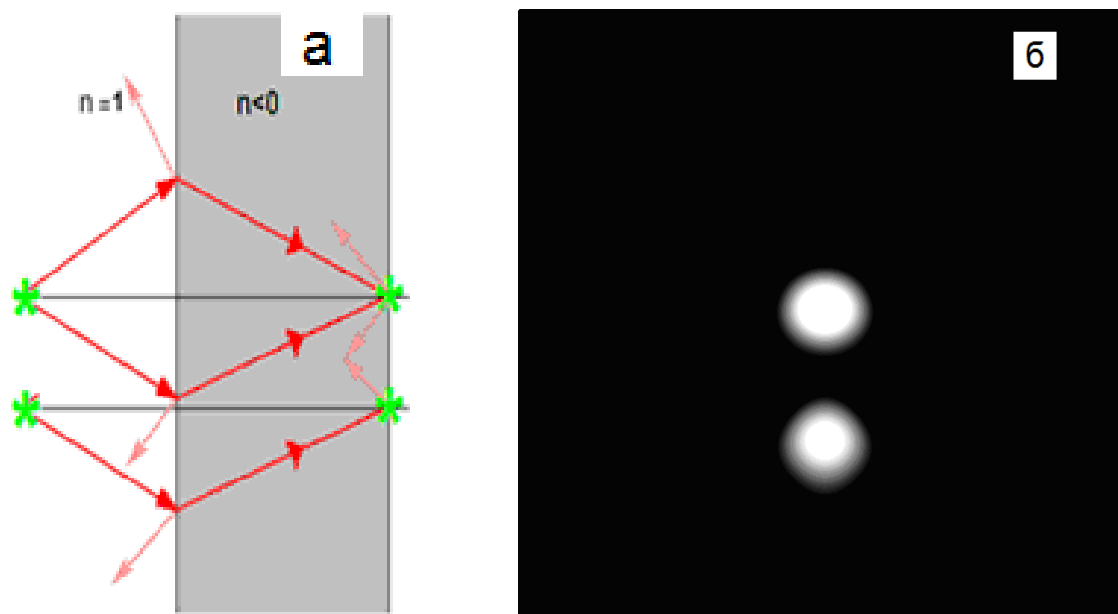


Рис. 2. Фокусировка на границу слоя метаматериала: а – ход лучей, б – результат численного эксперимента.

Расчет поля в этом случае так же осуществляется по формуле (1), но немного измененной. В ней появляется дополнительный множитель, соответствующий распространению в свободном пространстве за слоем:

$$E(r) = \hat{F}^{-1} \left\{ \exp \left[ i z \sqrt{k_0^2 n^2 - \kappa_{\perp}^2} \right] \exp [i k_0 z_0] \hat{F} \{ E(r_s) \} \right\}.$$

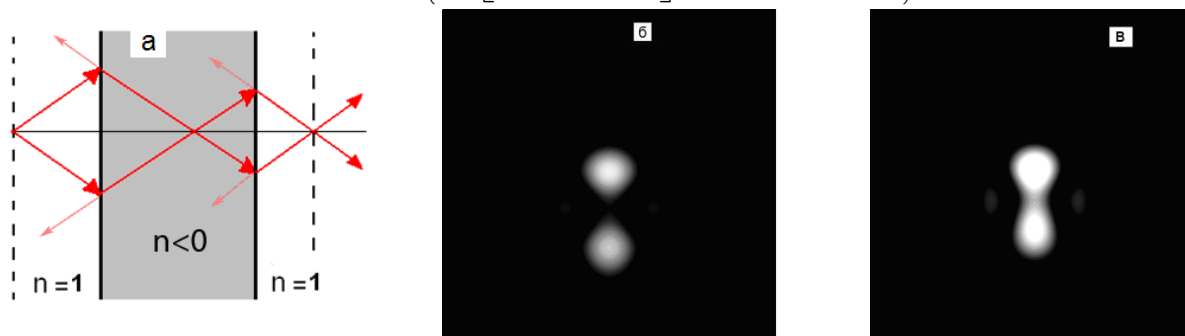


Рис. 3. Фокусировка за границу слоя метаматериала: а – ход лучей, б – результат численного эксперимента, в - с использованием обычной линзы.

На рис. 3б показан результат расчета эффекта фокусировки для случая  $n = -2 + 0,01i$ , с учетом многократных переотражений. Для сравнения на рис. 3в приводится пример фокусировки с использованием обычной собирающей линзы. В этом случае длина волны излучения источников равна 10 см, расстояние от источников до пластины равно 20 см, аналогично и для линзы, а толщина слоя равна  $L_0 = 56$  см, при этом фокусировка происходит на расстоянии  $z_0 = 33$  см от слоя. Поперечное расстояние между источниками составляет 9,5 см, что меньше длины волны. Как видно из рисунков, источники остаются различимы при использовании метаматериала, а в случае с линзой они различимы хуже.

Важно подчеркнуть, что использование метаматериалов в томографии имеет два важных достоинства: обработка сигналов (фокусировка) осуществляется предельно быстро (со скоростью света) и при этом фокусируются как однородные так и не однородные волны. Последнее обстоятельство позволит превзойти дифракционный предел и тем самым повысить пространственное разрешение в радиоволновой томографии.

Работа выполнена при поддержке ФЦП в рамках мероприятия 1.1. (ГК № 14.740.11.0076).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Walser Rodger. *Metamaterials What are they and what are they good for?* // Meeting of the American Physical Society. – March 20–24 2000.
2. John B. Pendry and David R. Smith. Reversing Light with Negative Refraction // *Physics Today*. – 2004. – Vol. 57. – No. 6. – P. 37–43.
3. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$  // *УФН*. – 1967. – Т. 92. – №7. – С. 517-526.
4. Якубов В.П., Беличенко В.П., Фисанов В.В. Основы электродинамики излучения и его взаимодействие с веществом. – Томск: Издательство НТЛ, 2010. – 296 с.
5. Якубов В.П., Мироньчев А.С., Андрейцов А.Г., Пономарева И.О. Искусственные метаматериалы и радиотомография // *Известия вузов, Физика*. – 2010. – Т. 53. – № 9. – С. 17-20.

### Сведения об авторах:

**Мироньчев А.С.:** Томск; ТГУ; магистрант; электродинамика, цифровая обработка сигналов и полей.

**Якубов В.П.:** Томск; ТГУ; профессор, зав.каф. РФ; электродинамика, статрадиофизика, цифровая обработка сигналов и полей.

Научное издание

## **ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ**

Материалы III Научно-практической конференции

**Издано в авторской редакции**

Компьютерная верстка: *Н.С. Старикова*  
Дизайн обложки: *И.А. Абрашкина*